

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ  
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет  
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла

---

«На правах рукопису»  
УДК 544.252.23

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ В.Й.Котовський  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 104 – фізика та астрономія (комп’ютерне  
моделювання фізичних процесів)

на тему: «Термооптичні та електрофізичні властивості диспергованих в  
полівінілацетаті рідкокристалічних холестеричних сумішей»

Виконала: студентка 2 курсу магістерського рівня, групи ОФ-81мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Несіна Лілія Романівна  
(прізвище, ім’я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н., В.Й. Котовський  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент проф., д.ф.-м.н., О.В. Ковальчук  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з  
праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**АНОТАЦІЯ**  
**ДО ЗВІТУ З МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**  
СТУДЕНТКИ ФМФ, 2 КУРСУ МАГІСТЕРСЬКОГО РІВНЯ ГР. ОФ-81мп  
**Несіної Лілії Романівни**

**На тему:** «Термооптичні та електрофізичні властивості диспергованих в полівінілацетаті рідкокристалічних холестеричних сумішей»

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор Котовський Віталій Йосипович.

**Актуальність:** актуальність дослідження холестеричних рідких кристалів визначається їх широким використанням в різних областях науки, медицини, техніки та ветеринарії. Вони лежать в основі виготовленні надчутливих рідкокристалічних термоіндикаторних плівок, головною перевагою яких є здатність змінювати колір при незначних змінах температури, а також можливість вимірювання дуже малих різниць температур на відстані порядку десятої частини міліметра.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри:** тема роботи відповідає пріоритетному науковому напрямку кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла – «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави». Робота виконана в межах держбюджетних тем та тематичних планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

**Об'єкт дослідження:** оптичні та електрофізичні властивості дисперсій холестеричних рідких кристалів у полівініловому спирті.

**Предмет дослідження:** вплив різних за складом (різних за температурним діапазоном існування холестеричної фази) сумішей холестеричних рідких кристалів на оптичні та електрофізичні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

**Мета роботи:** дослідити вплив різних за складом сумішей холестеричних рідких кристалів на оптичні та електрофізичні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

**Методи дослідження:** основні експериментальні результати роботи одержано за допомогою сучасних методів дослідження, а саме: діелектрична спектроскопія та оптична термографія.

**Відомості про обсяг звіту, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних:** звіт складається з переліку умовних позначень, символів, скорочень і термінів, вступу, основної частини (три розділи), висновків, переліку джерел посилання (53 найменування); містить 25 рисунків та 5 таблиць. Повний обсяг звіту – 80 сторінок.

**Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати:** метою індивідуального завдання є дослідження електрофізичних та термооптичних властивостей, а також особливостей будови холестеричних рідких кристалів. Одними із головних методів, які було розглянуто для створення та вивчення сумішей – це діелектрична спектроскопія та оптична термографія. У ході виконання завдання експериментальним шляхом було отримано два типи рідкокристалічних термоіндикаторних плівок: плівка типу 1, яка розрахована на діапазон температур, що відповідають нормальній температурі людського тіла та плівка типу 2, яка розрахована на діапазон температур, що відповідають підвищеній температурі людського тіла; також було досліджено частотні залежності провідності (опору) та діелектричної проникності (ємності) зразків при різних температурах, проведено аналіз отриманих експериментальних даних; досліджено спектри оптичного відбивання при різних температурах в діапазоні існування холестеричної фази; проведено порівняльне дослідження за допомогою термографа з охолоджуваною матрицею та термоіндикаторної рідкокристалічної плівки, на основі суміші холестеричних рідких кристалів.

**Висновок:** холестерики можна використовувати як: матеріали для запису інформації; регульовані електричним полем оптичні фільтри; прототипи систем нюху («електронного носа»); дзеркала з зміною довжини хвилі селективного відбивання світла під дією електричного поля, візуалізатори температурних полів, приймачі інфрачервоного і надвисокочастотного випромінювання. Це ще не весь перелік можливих практичних застосувань таких матеріалів. Тому практичне вивчення властивостей холестеричних рідких кристалів дасть можливість не тільки поліпшити характеристики вже запропонованих сфер використання таких матеріалів, а й відкрити нові можливості для впровадження наукових досягнень в практику, а також розширити їх межі використання. А реалізація таких можливостей буде важливою для потреб країни та загальнолюдської спільноти.

**Перелік ключових слів (не більше 20):** холестеричний рідкий кристал, полівініловий спирт, діелектрична спектроскопія, електричний опір, ємність, електрична провідність, діелектрична проникність, спектр відбивання, довжина хвилі.

**Підпис керівника** \_\_\_\_\_

## SUMMARY

### TO THE REPORT TO MASTER'S DISSERTATION

STUDENT OF FMF, 2 COURSE OF THE MASTER LEVEL, GR. OF-81mp

**Liliia Nesina**

**On the topic:** «Thermo-optical and electrophysical properties of crystals cholesteric liquid crystal mixtures»

**Scientific supervisor:** doctor of Technical Science, professor Vitalii Kotovskyi.

**Topicality:** the relevance of the research of liquid crystals is determined by the wide variety of their applications in different fields of science, medicine, technology and veterinary. Liquid crystals are a major thread in the manufacturing of hypersensitive liquid crystals of thermal indicator films which have not only the ability to change colour in order to minor modifications of temperature, but also the ability to measure small temperature difference for a tenth of a millimeter at a distance.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes cathedra:** the theme of the work corresponds to the priority scientific direction of the Department of General Physics and Solid State Physics - "Fundamental scientific researches on the most important problems of development of scientific and technical, socio-economic, human potential for ensuring the competitiveness of Ukraine in the world and sustainable development of society and the state." The work was carried out within the limits of the state budget topics and thematic plans of research works of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

**Object of research:** optical and electrophysical properties of dispersions of cholesterol liquid crystals in polyvinyl alcohol.

**Subject of research:** the influence of mixtures of cholesterol liquid crystals on the optical composition and electrophysical properties of their dispersions in polyvinyl alcohol in the composition (different in temperature range of the existence of the cholesteric phase).

**Purpose of work:** to investigate the effect of different compositions of mixtures of cholesterol liquid crystals on the optical and electrophysical properties of their dispersions in polyvinyl alcohol..

**Research methods:** the main experimental results of the work were obtained using modern methods of research, namely: dielectric spectroscopy and optical thermography.

**Information about the volume of the report, the number of illustrations, tables, applications and literary names in the list of used ones:** the report consists of a list of symbols, symbols, abbreviations and terms, introduction, main part (three sections), conclusions, list of references (53 titles); contains 25 figures and 5 tables. The full volume of the report is 80 pages.

***The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained:*** the purpose of the individual task is to study the electrophysical and thermo-optical properties, as well as the features of the structure of cholesterol liquid crystals. One of the main methods considered for the creation and study of mixtures is dielectric spectroscopy and optical thermography. In the course of the task, two types of liquid crystal thermo-indicator films were obtained experimentally: a film of type 1 calculated for the temperature range corresponding to the normal temperature of the human body and a film of type 2 calculated for the temperature range corresponding to an elevated temperature of the human body; frequency dependences of conductivity (resistance) and dielectric constant (capacitance) of the samples at different temperatures were also investigated and the experimental data obtained were analyzed; spectra of optical reflection at different temperatures in the range of cholesterol phase existence are investigated; a comparative study was performed using a cooled matrix thermograph and a liquid crystal film, based on a mixture of cholesteric liquid crystals.

***Conclusion:*** cholesterol can be used as: materials for recording information; electrically adjustable optical filters; prototypes of olfactory systems ("electronic nose"); mirrors with changing wavelength of selective reflection of light under the influence of electric field, visualizers of temperature fields, receivers of infrared and ultra-high frequency radiation. This is not the full list of possible practical applications of such materials. Therefore, a practical study of the properties of cholesterol liquid crystals will not only improve the characteristics of the already proposed areas of use of such materials, but also open up new opportunities for the implementation of scientific achievements in practice, as well as expand their limits of use. And the realization of such opportunities will be important for the needs of the country and the human community.

***Keyword list (no more than 20):*** liquid crystals, cholesterics, , cholesteric mixtures, chiral molecules, temperature indicator, thermo-optical properties, polyvinyl acetate.

***Signature of the head*** \_\_\_\_\_

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет \_\_\_\_\_ фізико-математичний  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ загальної фізики та фізики твердого тіла  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 104 – фізика та астрономія (комп'ютерне моделювання фізичних процесів)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В. Й. Котовський

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Несіній Лілії Романівні**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Термооптичні та електрофізичні властивості диспергованих в полівінілацетаті рідкокристалічних холестеричних сумішей»

Науковий керівник проф., д.т.н., В.Й. Котовський,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 07.11.2019р. № 3850-с

2. Строк подання студентом дисертації 11.12.2019

3. Об'єкт дослідження оптичні та електрофізичні властивості дисперсій холестеричних рідких кристалів у полівініловому спирті.

4. Предмет дослідження вплив різних за складом (різних за температурним діапазоном існування холестеричної фази) сумішей холестеричних рідких кристалів на оптичні та електрофізичні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

### 5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- виготовити два типи термоіндикаторних плівок на основі сумішей рідких кристалів, сажі та полімеру;
- дослідити частотні залежності діелектричної проникності (ємності) зразків при різних температурах;
- дослідити частотні залежності провідності (опору) зразків;
- дослідити ефективність термоіндикаторних плівок в області термографії.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: «Рідкокристалічні мезофази», «Структура холестериків», «Блок-схема пристрою для вимірювання ємності та опору», «Рідкокристалічні термоіндикаторні плівки», «Частотні залежності опору зразка», «Частотні залежності ємності зразка», «Температурна залежність довжини хвилі селективного відбивання шару холестеричного рідкого кристалу», «Топографія розподілу температури холестеричних рідких кристалів», «Термограф з охолоджуваною матрицею сенсорів на базі діодів Шотткі», «Розподіл температури на поверхні шкірного покриву верхньої кінцівки людини».

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття на тему «The use of cholesteric liquid crystal mixtures» до XX Міжнародної студентської науково-практичної конференції “Science and Technology of the XXI Century” 28 листопада 2019 року.

### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

### 9. Дата видачі завдання 02.09.2019

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці.	02.09.2019 - 03.09.2019	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи та засвоєння рекомендацій про виконання програми практики.	04.09.2019 - 06.09.2019	Виконано
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	09.09.2019 - 19.09.2019	Виконано
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	23.10.2019 - 27.10.2019	Виконано

5	Наукові дослідження за темою МД	30.10.2019 - 03.11.2019	Виконано
6	Складання заліку з науково-дослідної практики	05.11.2019	Виконано
7	Аналіз отриманих результатів	13.11.2019 - 17.11.2019	Виконано
8	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних по темі МД	20.11.2019 - 22.11.2019	Виконано
9	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	23.11.2019 - 27.12.2019	Виконано
10	Надання роботи на перевірку керівнику МД	29.11.2019	Виконано
11	Отримання відгуку від керівника МД	03.12.2019	Виконано
12	Перевірка МД на плагіат	5.12.2019	Виконано
13	Формування плану публікацій по темі МД або документів по впровадженню (лист з підприємства або подання проекту впровадження в КПП ім. Ігоря Сікорського)	6.12.2019 - 9.12.2019	Виконано
14	Подання МД на рецензію	10.12.2019	Виконано
15	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	11.12.2019	Виконано
16	Попередній захист МД	11.12.2019	Виконано
17	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	12.12.2019 - 15.12.2019	Виконано
18	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедру загальної фізики та ФТТ	16.12.2019	Виконано
19	Відсилення анотації МД на сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	16.12.2019	Виконано
20	Остаточний захист МД	19.12.2019	Виконано
21	Відсилення матеріалів МД у бібліотеку КПП ім. Ігоря Сікорського та сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	19.12.2019	Виконано

Студент

Науковий керівник роботи

\_\_\_\_\_  
( підпис )

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Несіна Л.Р.  
(прізвище та ініціали)

Котовський В.Й.  
(прізвище та ініціали)



## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми:** актуальність дослідження властивостей холестеричних рідких кристалів визначається їх широким використанням в різних областях науки, медицині, техніки та ветеринарії. Вони лежать в основі виготовленні надчутливих рідкокристалічних термоіндикаторних плівок, головною перевагою яких є здатність змінювати колір при незначних змінах температури, а також можливість вимірювання дуже малих різниць температур на відстані порядку десятої частини міліметра.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:** тема роботи відповідає пріоритетному науковому напрямку кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла – «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави». Робота виконана в межах держбюджетних тем та тематичних планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

**Об'єкт дослідження:** оптичні та електрофізичні властивості дисперсій холестеричних рідких кристалів у полівініловому спирті.

**Предмет дослідження:** вплив різних за складом (різних за температурним діапазоном існування холестеричної фази) сумішей холестеричних рідких кристалів на оптичні та електрофізичні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

**Мета роботи:** дослідити вплив різних за складом сумішей холестеричних рідких кристалів на оптичні та електрофізичні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

**Методи дослідження:** основні експериментальні результати роботи одержано за допомогою сучасних методів дослідження, а саме: діелектрична спектроскопія та оптична термографія.

**Задачі дослідження:**

1. Виготовити два типи термоіндикаторних плівок на основі сумішей рідких кристалів, сажі та полімеру.
2. Дослідити спектри оптичного відбивання при різних температурах в діапазоні існування холестеричної фази.
3. Дослідити вплив сумішей холестеричних рідких кристалів на діелектричні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

**Наукова новизна одержаних результатів:** вперше проведено комплексне дослідження щодо впливу різного типу сумішей холестеричних рідких кристалів на оптичні та електрофізичні властивості їх дисперсій у полівініловому спирті.

**Практичне значення одержаних результатів:** отримані в магістерській роботі дані важливі для розробки та діагностики властивостей рідкокристалічних термоіндикаторів на основі холестеричних рідких кристалів.

**Публікації:** стаття на тему «The use of cholesteric liquid crystal mixtures» до XX Міжнародної студентської науково-практичної конференції “Science and Technology of the XXI Century” 28 листопада 2019 року.

**Ключові слова:** холестеричний рідкий кристал, полівініловий спирт, діелектрична спектроскопія, електричний опір, ємність, електрична провідність, діелектрична проникність, спектр відбивання, довжина хвилі.

**В роботі наведено:** використаної літератури - 53, сторінок: - 80, рисунків - 25, таблиць - 5.

## ABSTRACT

**Actuality of theme:** the relevance of the research of liquid crystals is determined by the wide variety of their applications in different fields of science, medicine, technology and veterinary. Liquid crystals are a major thread in the manufacturing of hypersensitive liquid crystals of thermal indicator films which have not only the ability to change colour in order to minor modifications of temperature, but also the ability to measure small temperature difference for a tenth of a millimeter at a distance.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes:** the theme of the work corresponds to the priority scientific direction of the Department of General Physics and Solid State Physics - "Fundamental scientific researches on the most important problems of development of scientific and technical, socio-economic, human potential for ensuring the competitiveness of Ukraine in the world and sustainable development of society and the state." The work was carried out within the limits of the state budget topics and thematic plans of research works of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

**Object of research:** optical and electrophysical properties of dispersions of cholesterol liquid crystals in polyvinyl alcohol.

**Subject of research:** the influence of mixtures of cholesterol liquid crystals on the optical and electrophysical properties of their dispersions in polyvinyl alcohol in the composition (different in temperature range of the existence of the cholesteric phase).

**Purpose of work:** investigate the effect of different cholesterol liquid crystal mixtures on the optical and electrophysical properties of their dispersions in polyvinyl alcohol.

**Research methods:** the main experimental results of the work were obtained using modern research methods, namely: dielectric spectroscopy and optical thermography.

**Tasks of research:**

1. Make two types of thermal film based on mixtures of liquid crystals, soot and polymer.
2. Investigate spectra of optical reflection at different temperatures in the range of cholesterol phase.
3. Investigate the effect of mixtures of cholesterol liquid crystals on the dielectric properties of their dispersions in polyvinyl alcohol.

**Scientific novelty of the results:** for the first time, a comprehensive study on the effect of different types of mixtures of cholesterol liquid crystals on the optical and electrophysical properties of their dispersions in polyvinyl alcohol.

**The practical significance of the results:** the data obtained in the master's thesis are important for the development and diagnostics of the properties of liquid crystal thermal indicators based on cholesterol liquid crystals.

**Publications:** an article on the topic "The use of cholesteric liquid crystal mixtures" was published for the XX International Student Scientific and Practical Conference "Science and Technology of the XXI Century" November 28, 2019.

**Keywords:** cholesterol liquid crystal, polyvinyl alcohol, dielectric spectroscopy, electrical resistance, capacitance, electrical conductivity, dielectric constant, reflection spectrum, wavelength.

**The article contains:** used literature - 53, pages: - 80, pictures - 25, tables - 5.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ I ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИКОРИСТАННЯ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ.....	13
1.1 Рідкі кристали та їх класифікація.....	13
1.2 Структури холестеричних рідких кристалів .....	17
1.3 Текстури холестеричних рідких кристалів .....	19
1.4 Типи холестеричних рідких кристалів .....	22
ВИСНОВКИ ДО I РОЗДІЛУ .....	26
РОЗДІЛ II ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ .....	28
2.1 Методика виготовлення рідкокристалічних плівок .....	29
2.2 Експериментальне дослідження частотних залежностей опору та ємності зразків .....	31
2.2.1 Результати експерименту.....	34
2.2.2 Обробка експериментальних результатів.....	39
2.3 Електрооптика холестериків .....	48
ВИСНОВКИ ДО II РОЗДІЛУ .....	54
РОЗДІЛ III ТЕРМООПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ.....	55
3.1 Дослідження селективного розсіювання світла .....	56
3.2 Термічне старіння холестеричних сумішей .....	62
3.3 Холестерична рідкокристалічна термографія.....	64
ВИСНОВКИ ДО III РОЗДІЛУ .....	73
ВИСНОВКИ .....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	76

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

КХРТ – контактна холестерична рідкокристалічна термографія

НРК – нематичний рідкий кристал

ПАР – поверхнево активна речовина

ПАХ – поверхнева акустична хвиля

ПВА – полівінілацетат

ПГНС – польова гомеотропно-нематична структура

РК – рідкий кристал

СРК – смектичний рідкий кристал

ХРК – холестеричний рідкий кристал

## ВСТУП

Рідкі кристали поєднують в собі реологічні властивості рідин (текучість, поверхневий натяг) і анізотропні фізичні властивості твердих кристалічних тіл. Анізотропія оптичних, електричних, магнітних, пружних й інших властивостей рідких кристалів обумовлена впорядкованим розташуванням анізометрічних молекул цих речовин в рідкокристалічному стані.

З існуючих типів рідких кристалів до теперішнього часу краще за всіх вивчені і широко застосовуються термотропні рідкі кристали: нематичні, холестеричні й смектичні.

Завдяки малості енергетичних констант у рідкокристалічному стані структура (отже і властивості) рідких кристалів дуже чутлива до зовнішніх впливів (електричних, магнітних, теплових, механічних та ін.). Це призводить до виникнення цілого ряду електро- та магнітооптичних, термооптичних, флексоелектричних та інших ефектів, велика частина яких знайшла застосування в науці і техніці [1 - 4].

Одним з найбільш цікавих видів рідких кристалів є холестеричні рідкі кристали (холестерики), зважаючи на їх унікальні оптичні властивості (селективне відображення світла, круговий дихроїзм, велика оптична активність, зміна кроку спіральної структури при зміні температури та інші).

В даний час холестерики знайшли застосування в якості візуалізаторів температурних полів завдяки здатності змінювати свій колір при зміні температури. На їх основі розроблено приймачі інфрачервоного і надвисокочастотного випромінювання. За допомогою холестериків вдається також реєструвати незначні концентрації парів різних хімічних речовин в повітрі.

Холестеричні рідкі кристали, а також їх суміші багато науковців розглядають як перспективні матеріали, які можна застосовувати в досить

широкому спектрі пристроїв. Наукові результати фундаментального дослідження властивостей ХРК дозволять глибше зрозуміти фізичні процеси, які відбуваються у ХРК під дією зовнішніх факторів (електричного та магнітного полів, температури) і таким чином розширити межі практичного застосування таких матеріалів.

На сьогоднішній день актуальність дослідження холестеричних рідких кристалів обумовлена можливостями їх ефективного застосування в ряді галузей виробничої діяльності і широким використанням в різних областях науки, медицини, техніки та ветеринарії.



## РОЗДІЛ І ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИКОРИСТАННЯ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ

### 1.1 Рідкі кристали та їх класифікація

Рідкі кристали - це великий клас сполук, переважно органічних, що характеризуються обов'язковою присутністю орієнтаційного порядку. Наявність орієнтаційного порядку передбачає, що їх структурні одиниці є анізотричними.

Рідкі кристали утворюються при плавленні певних органічних речовин, молекули яких мають видовжену, "паличкоподібну" форму. При подальшому нагріванні рідкокристалічна, або мезофаза, переходить в ізотропну рідку фазу. При охолодженні речовини з ізотропного розплаву зазначені фази утворюються в зворотній послідовності [5 - 8].

Існують термотропні і ліотропні рідкі кристали. У першому випадку мезофаза утворюється при термічному впливі на речовину (нагрівання або охолодження). В ліотропних з'єднаннях структурна організація залежить від двох параметрів - температури і концентрації речовини. Вони утворюються під час розчину ряду так званих амфільних речовин у певних розчинниках. Дана мезофаза існує в біологічних системах, що функціонують в воді (мембрани клітин, віруси). Термотропні рідкі кристали існують у певному інтервалі температур.

Існування проміжного, термодинамічно стабільного, стану між твердим кристалічним і ізотропним рідким станами обумовлено тим, що завдяки паралельній орієнтації анізотричних молекул досягається виграв деякої кількості енергії, що зменшує внутрішню енергію системи. Якщо температура речовини вище критичної, то енергія теплового руху молекул стає більше енергії дисперсійної взаємодії (відповідальної за утворення

мезофази) і паралельне вибудовування молекул стає неможливим; система переходить в ізотропний рідкий стан. Критична температура переходу різна для різних рідких кристалів.

Речовина в рідкокристалічному стані володіє реологічними властивостями рідини (текучість, поверхневий натяг, злиття крапель і т.д.) і анізотропними властивостями твердих кристалічних тіл (подвійне променезаломлення, пружність і т.д.).

Орієнтаційний порядок проявляється в тому, що виділені осі структурних елементів орієнтовані уздовж деякого напрямку. Таких напрямків в просторі може бути один (одновимірний орієнтаційний порядок), два або три. Деякі РК додатково мають частковий трансляційний порядок. Він не може бути тривимірним - це характерно для твердого кристала. Але дво - і одновимірні трансляційні порядки зустрічаються серед РК досить часто. Залежно від характеру мікроскопічного упорядкування РК прийнято ділити на декілька типів - нематичні, холестеричні і смектичні [9].

Нематичні рідкі кристали (нематики) характеризуються далеким орієнтаційним порядком в розташуванні молекул і повною свободою переміщення центрів тяжіння окремих молекул у просторі (рис.1.1.1, а). Нематичні рідкі кристали являють собою оптично-одноосьове середовище, структура якого неполярна, тобто паралельне і антипаралельне вибудовування молекул рівноймовірне. Зазвичай, нематичні рідкі кристали застосовуються або досліджуються в так званому плоскому капілярі, що представляє собою два плоскопаралельних скла з прозорими покриттями і прокладкою між ними. Спеціальними видами обробки скла (наприклад, натиранням скла дрібним абразивним порошком або алмазною пастою в одному напрямку, застосуванням ПАХ і т.д.) можна отримати різні орієнтації молекул в нематичному шарі по відношенню до площин скла комірки.

Аналогічні орієнтації молекул можна отримати також при застосуванні електричних і магнітних полів, оскільки молекули нематичних рідких кристалів, як правило, мають електричну і магнітну анізотропію.

Якщо молекули нематика лежать паралельно склу плоского капіляра і орієнтовані в одному напрямку, то така текстура називається планарною або гомогенною. Такий зразок нематика в оптичному відношенні нічим не відрізняється від пластинки, вирізаної з твердого оптично-одноосьового позитивного кристала паралельно оптичній осі. Якщо ж молекули нематика орієнтовані перпендикулярно склу, то така текстура називається гомеотропною. В оптичному відношенні така текстура поводить себе як пластинка одноосьового позитивного кристала, яку ми розглядаємо уздовж оптичної осі.

У смектичних кристалах молекули розташовуються шарами паралельно один до одного (рис.1.1.1, б). Смектичні рідкі кристали (смектики) діляться на два великі класи: з неструктурними і зі структурними шарами. У смектиків першого класу шари є "рідкими": центри тяжіння молекул в шарах не впорядковані. Молекули смектиків зі структурними шарами мають менше ступенів свободи; центри тяжіння молекул в шарах впорядковані.

Холестеричні рідкі кристали (холестерики) локально, на відстанях порядку розмірів молекул, нічим не відрізняються від нематиків; довгі осі всіх молекул умовно розташовані в шарах. Однак на великих відстанях напрямок переважної орієнтації молекул в шарах закономірно змінюється; всі молекули поступово повертаються, утворюючи спіральну структуру (рис.1.1.1, в).

Крок спіралі у різних з'єднань різний, від десятків ангстрем до декількох мікрометрів і змінюється під дією різних факторів: температури, електричного поля, парів різних хімічних речовин і т.д.

Якщо крок спіралі має порядок довжини хвилі видимого світла, то періодичність структури призводить до брегівського дифракційного розсіювання світла на ній і такі холестерики здаються пофарбованими. Це явище носить назву селективного відбиття світла і є типовим для складних ефірів холестерину. Холестерики володіють також величезною оптичною

активністю ( $10^2$ - $10^4$  град/см) та круговим дихроїзмом. Всі ці властивості легко змінюються зовнішніми впливами, що і обумовлює їх широке практичне застосування.

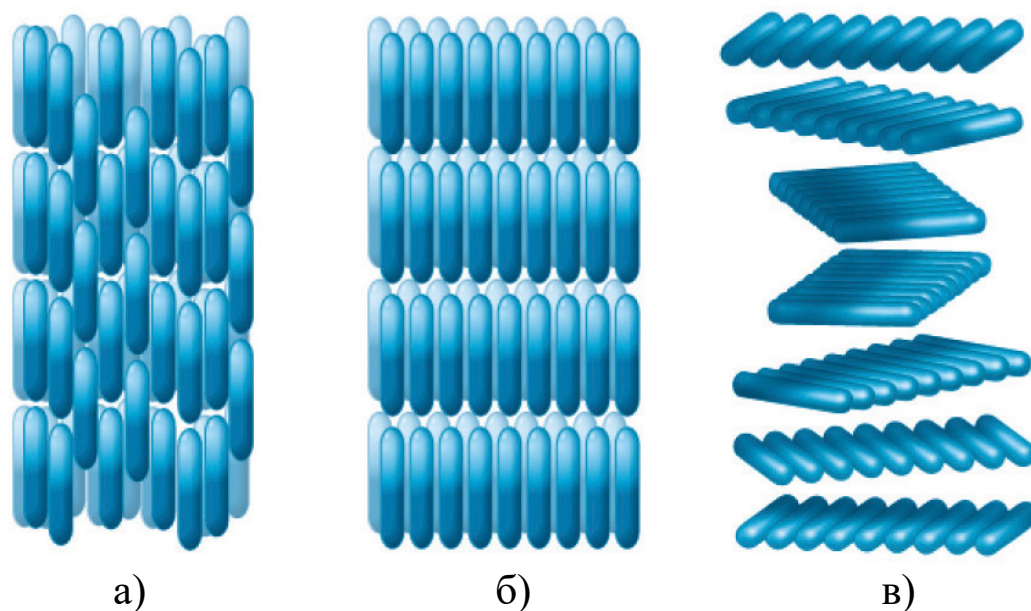


Рисунок 1.1.1. Схематичне зображення нематичної (а), смектичної (б) та холестеричної (в) мезофаз.

У теоретичному та практичному відношенні великий інтерес представляють суміші рідких кристалів. Найцікавіші і багаті можливостями суміші за участю холестеричних рідких кристалів. Для суміші двох холестериків найцікавішою є проблема залежності кроку спіралі від складу суміші.

## 1.2 Структура холестеричних рідких кристалів

Структура ХРК показана на рисунку 1.2.1. Довгі осі молекул, що утворюють ХРК, в будь-якій площині, перпендикулярній оптичній осі, орієнтовані однаково, причому відсутній дальній порядок в розташуванні центрів тяжіння молекул. Орієнтація осей молекул як функція координат змінюється за законом:

$$\varphi(z) = \frac{2\pi z}{p}, \quad (1.2.1)$$

де  $\varphi(z)$  - кут повороту осі молекули в площині. Величина  $p$  називається періодом або кроком холестеричної спіралі. На відстані  $p$  уздовж осі  $z$  осі молекул повертаються на кут, рівний  $2\pi$ . Характерне значення величини  $p$  для великої кількості ХРК становить сотні нанометрів, хоча зустрічаються ХРК з кроком спіралі порядку десятків мікрон.

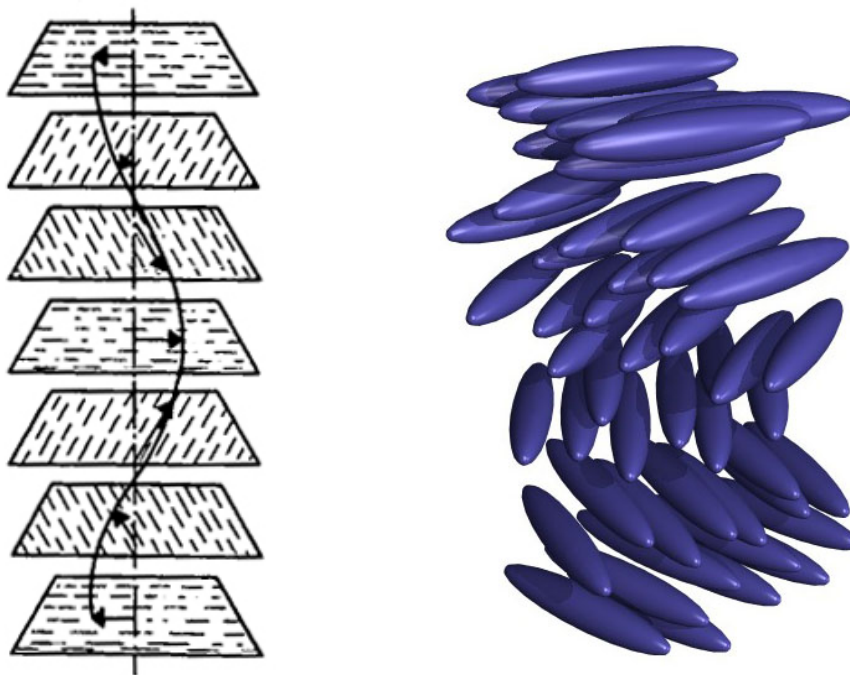


Рисунок 1.2.1. Схематичне зображення структури ХРК (в межах кожного молекулярного шару орієнтаційний порядок чисто нематичний) [9].

Будова ХРК, яка показана на рисунку 1.2.1, є ідеалізованим поданням. Зокрема, для фіксованого значення  $z$  (тобто в межах одного молекулярного шару) орієнтації окремих молекул можуть злегка відрізнятися один від одного, а формула (1.2.1) описує залежить від  $z$  середньої орієнтації молекул.

Напрямок середньої орієнтації молекул прийнято описувати одиничним вектором  $n$ , так званим директором. Ступінь впорядкованості молекул характеризується параметром порядку:

$$S = \frac{1}{2}(3\langle \cos^2 \theta \rangle - 1), \quad (1.2.2)$$

де  $\langle \cos^2 \theta \rangle$  – середній квадрат косинуса кута відхилення довгої осі молекул від напрямку директора  $n$ . Таким чином, формула (1.2.1) описує просторову зміну орієнтації директора, яка при  $S \neq 1$  в середньому співпадає з орієнтацією осей молекул.

### 1.3 Текстури холестеричних рідких кристалів

Всі оптичні ефекти в РК досліджуються в тонких шарах РК, певним чином орієнтованих між двома опорними паралельними поверхнями. Однорідна орієнтація РК задається спеціальною обробкою обмежувальних поверхонь або введенням до складу досліджуваного РК спеціальних добавок - поверхнево активних речовин – орієтантів [10]. Текстурні переходи спостерігаються під впливом зовнішніх факторів (електричне або магнітне поле, температура, механічні напруги).

Макроскопічна структура орієнтованих шарів РК може бути вивчена методом поляризаційної мікроскопії. Сукупність структурних деталей, виявлена оптичним методом, називається текстурою. Кожний тип РК утворює характерні для даного типу РК текстури, хоча також і дуже схожі текстури можуть спостерігатися для різних типів РК. Багато експериментального матеріалу по різних структурах всіх типів РК можна знайти в [8,10,11]. Розглянемо деякі характерні для ХРК текстури, які представляють практичний інтерес.

У планарній текстурі (рис. 1.3.1) вісь холестеричної спіралі перпендикулярна до обмежувальних поверхонь, а директор кожного шару лежить в площині, паралельній цим поверхням (планарна орієнтація ХРК молекул). Планарна текстура є оптично активною.

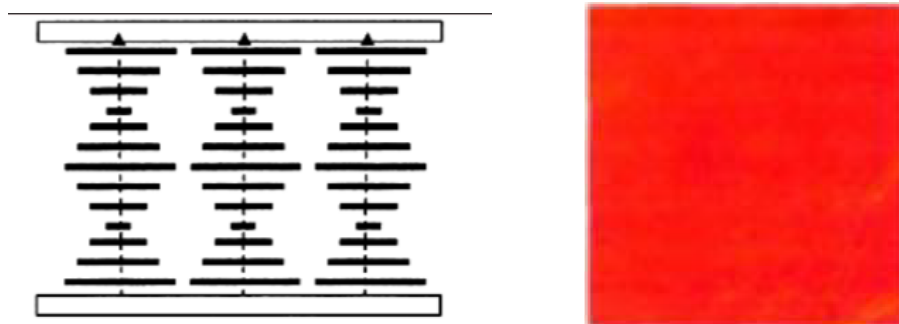


Рисунок 1.3.1. Планарна текстура ХРК. Праворуч - зображення планарної текстури, отримане методом оптичної поляризаційної мікроскопії.

У випадку, коли напрямки осі спіралі в різних ділянках одного і того ж зразка довільні по азимуту і не паралельні до обмежувальних поверхонь, має місце фокально-конічна (або конфокальна) текстура (рис. 1.3.2). Така текстура сильно розсіює світло, в основному на межі між окремими доменами, всередині яких зберігається однорідна орієнтація молекул. Внаслідок різкої зміни показника заломлення на межі цих доменів і виникає розсіювання світла фокально-конічною текстурою.

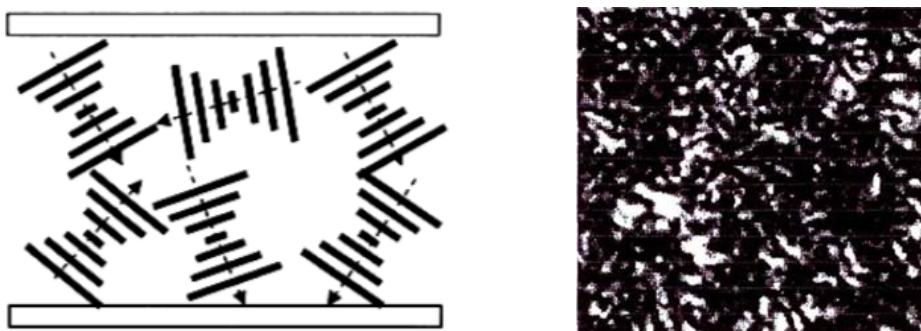


Рисунок 1.3.2. Фокально-конічна текстура ХРК. Праворуч зображення фокально-конічної (або конфокальної) текстури в поляризованому світлі (схрещені поляризатори).

У планарній текстурі розсіювання світла обумовлено лише термічними флуктуаціями орієнтаційного порядку, як і в орієнтованих шарах НРК [12, 13]. Розсіювання світла планарною текстурою більше, ніж розсіювання в ізотропних рідинах, але незрівнянно слабкіше, ніж розсіювання в фокально-конічній текстурі. У текстурі "відбитків пальців" розсіювання світла приблизно того ж порядку, що і для планарної текстури. Для текстури "відбитків пальців" характерно положення осі спіралі паралельно до обмежувальних поверхонь (рис. 1.3.3).



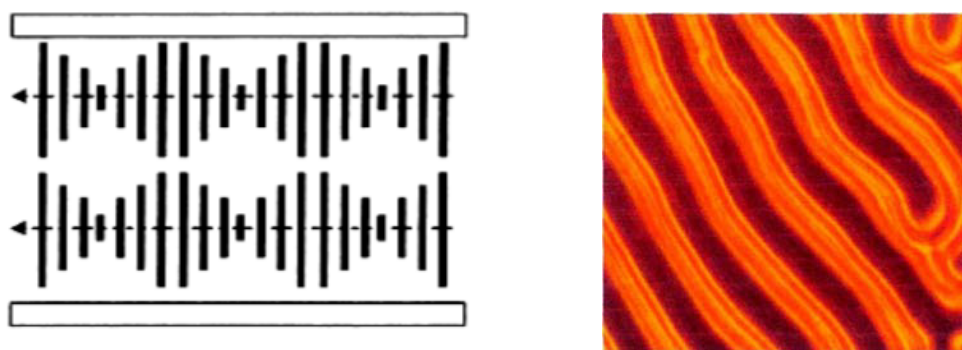


Рисунок 1.3.3. Текстура «відбитків пальців». Схематичне зображення (а). Вид текстури в поляризованому світлі (б) (схрещені поляризатори).

Коли електричне (магнітне) поле перевищує деяке порогове значення, характерне для кожного ХРК, то відбувається розкручення холестеричної спіралі і молекули ХРК вишиковуються уздовж поля, перпендикулярно опорним поверхням. Така текстура ХРК відповідає гомеотропній текстурі НРК (рис. 1.3.4), і в цьому стані ХРК характеризується так званою польовою гомеотропно-нематичною структурою [14]. ПГНС характеризується малим розсіюванням світла.

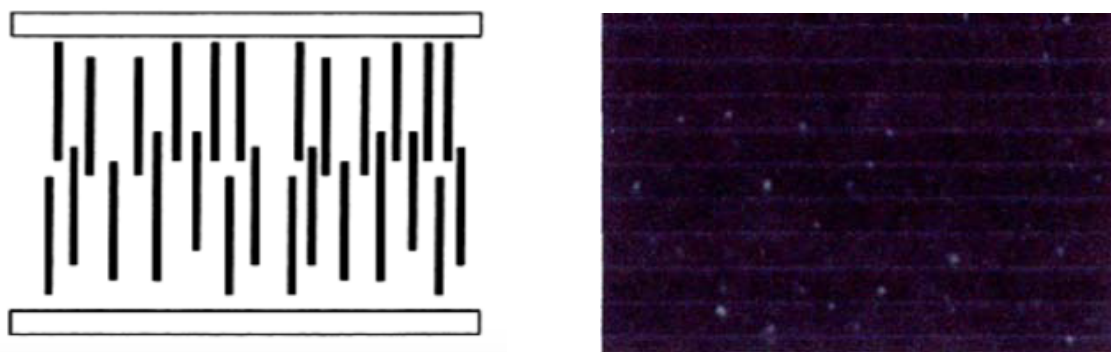


Рисунок 1.3.4. Гомеотропна текстура ХРК в полі. Холестерична спіраль розкручена. Схематичне зображення (а). Вид текстури в поляризованому світлі (б) (схрещені поляризатори).

## 1.4 Типи холестеричних рідких кристалів

Холестеричною фазою можуть володіти з'єднання, які мають недзеркальносиметричні (хіральні) молекули анізотричної форми. Індивідуальні хімічні сполуки рідко використовуються в РК композитах. Зазвичай це багатокомпонентні суміші ХРК, що дозволяють шляхом зміни складу досягати оптимального поєднання властивостей [15 - 17].

Поряд з природними речовинами, що володіють холестеричною фазою в деякому температурному інтервалі, можливе отримання холестеричної фази шляхом приготування сумішей. Ці суміші утворюються різнорідними компонентами: НРК з похідними холестерину, НРК з хіральною нематиком, НРК з оптично активною добавкою. Суміші на основі НРК і хіральних добавок, зберігаючи низьку в'язкість, широкий температурний інтервал фази і хімічну стабільність, властиві «чистим» НРК, проявляють оптичні та електрооптичні властивості ХРК. Суміші нематиків з оптично активними добавками (ХРК або немезогенні хіральні добавки) називаються індукованими ХРК. Саме РК матеріали на основі індукованих ХРК активно розробляються останнім часом в силу їх перспективності в різних областях оптоелектроніки.

В індукованому ХРК крок спіралі визначається з урахуванням закручувальної здатності  $\beta$  ХД [18]:

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{\beta c_d}, \quad (1.4.1)$$

де  $c_d$  - концентрація ХД в суміші з НРК. Крок спіралі може бути легко змінений шляхом зміни концентрації ХД. Закручувальна здатність ХД  $\beta$  - характерний параметр для даної ХД і він зазвичай слабо залежить від типу НРК, в якому розчиняється ХД. В останній час найбільшого застосування

отримали ХД з високою закручувальною здатністю, оскільки вони дозволяють отримувати ХРК з кроком спіралі у видимому діапазоні довжин хвиль, що неможливе при використанні традиційних ХРК як ХД, що володіють низькою закручувальною здатністю ( $8-12 \text{ мкм}^{-1}$ ) [19, 20].

Температурний інтервал холестеричної мезофази. Холестерична фаза зазвичай існує в деякому температурному інтервалі безпосередньо від точки плавлення звичайної кристалічної фази і до більш високої температури, що відповідає переходу ХРК - ізотропна рідина. Тому РК фази називають мезофазами (тобто проміжна фаза). Уявлення про температурний діапазон холестеричної фази можна отримати з фазових діаграм. Їх аналіз дає інформацію про поведінку компонентів суміші в процесі нагрівання і охолодження, про змішуваність компонентів, про тип мезофазних переходів (якщо вони є) [21 - 23].

ХРК - оптично активне середовище. ХРК володіють дивовижними оптичними властивостями. Внаслідок наявності орієнтаційної порядку РК є оптично анізотропними середовищами. Планарна текстура ХРК має властивості одновісного негативного кристалу [24].

В силу періодичності структури ХРК його планарна текстура вибірково відбиває світло певної поляризації і певної довжини хвилі  $\lambda_{\text{max}}$ . Селективне відбивання в околі  $\lambda_{\text{max}}$  означає, що освітлена білим світлом плоска текстура ХРК буде здаватися пофарбованою в колір, відповідний  $\lambda_{\text{max}}$ . Виникнення забарвлення плоскої текстури ХРК при її освітленні білим світлом може бути пояснено таким чином. Якщо розглядати ХРК як систему паралельних шарів товщиною  $p/2$ , що мають середній показник заломлення  $\tilde{n}$ , то вона буде діяти як дифракційна решітка. Довжина хвилі світла, що має при інтерференції максимальну інтенсивність, буде відповідати умові Вульфа-Брегга:

$$2\tilde{n}d \sin \theta = \lambda_{\text{max}} , \quad (1.4.2)$$

де  $d = p/2$  - період решітки і  $\theta$  - кут між падаючим променем і холестеричною площиною. При  $\theta = 90^\circ$  (нормальне падіння) вийде:

$$\tilde{n}p = \lambda_{\max}. \quad (1.4.3)$$

Таким чином, при нормальному падінні світла плоска текстура ХРК буде селективно відбивати світло з довжиною хвилі, приблизній кроку спіралі  $p$ . Для багатьох ХРК  $p \approx 400-700$  нм і отже,  $\lambda_{\max}$  лежить у видимій області [25].

Вище було розглянуто випадок нормального падіння світла на площину планарної текстури. У реальних зразках ХРК досить часто спостерігається мозаїчність - текстура складається з блоків (областей), в кожному з яких холестеричні площини повернені відносно один одного і площини зразка. У цьому випадку довжина хвилі селективного відбиття пов'язана з кутом падіння  $\theta_1$  і кутом спостереження  $\theta_2$  наступним чином:

$$\lambda_{\max} = 2\tilde{n}d \cos \frac{1}{2} \left[ \arcsin \frac{\sin \theta_1}{\tilde{n}} + \arcsin \frac{\sin \theta_2}{\tilde{n}} \right]. \quad (1.4.4)$$

З формули (1.4.4) випливає, що плоска текстура ХРК змінює свій колір при зміні як кута падіння білого світла, так і кута спостереження.

Спектральна ширина селективного відбиття визначається як  $\Delta\lambda = p\Delta n$ , де  $\Delta n$  анізотропія двопроменезаломлення ХРК [26].

Висока лабільність структури РК конкретизується в ХРК сильною температурною залежністю кроку спіралі. Таким чином, якщо крок спіралі порядку довжини хвилі видимого світла, то зі зміною температури плоска текстура ХРК буде змінювати свій колір.

У більшості ХРК і їх сумішей  $\lambda_{\max}$  з ростом температури зміщується в бік більш коротких довжин хвиль. Однак є ХРК зі зворотним ходом

температурної залежності  $\lambda_{\max}$ , та існують холестеричні суміші з двома областями селективного відображення [27 - 29].

При поширенні світла вздовж оптичної осі спостерігається обертання площини поляризації на дуже великі кути:  $10^4$ - $10^5$  град/мм. Обертання площини поляризації залежить від довжини хвилі падаючого світла: поблизу довжин хвиль сильного обертання відбувається зміна знаку обертання, точка інверсії -  $\lambda_{\max}$ . Области з різним знаком обертання розділені не смугою поглинання, як в звичайних гіротропних речовинах, а смугою селективного відбиття світла з круговою поляризацією, яка за знаком збігається зі знаком холестеричної спіралі [30 - 32].

## ВИСНОВКИ ДО I РОЗДІЛУ

1. У даному розділі розглянуто рідкі кристали, їх класифікацію, а також описані властивості та особливості структури холестеричних рідких кристалів. Описано основні текстури холестеричних рідких кристалів, проведено їх аналіз та порівняння.

2. Аналіз літературних даних з ХРК дозволяє зробити висновок, що про існування рідких кристалів стало відомо порівняно давно, але багато експериментів, які можна було провести багато років тому, проведені тільки зараз. Структура рідкого кристала надзвичайно рухлива, мобільна: досить невеликих зовнішніх впливів, щоб вона змінилася, а це відразу ж призводить до зміни макроскопічних властивостей речовини. Отже, рідкі кристали є унікальним матеріалом, властивості якого можна легко змінювати.

2. Аналіз літературних даних дозволяє сформулювати мету і основні завдання даної дисертаційної роботи. Метою роботи є дослідження властивостей та особливостей будови холестеричних рідких кристалів, які широко використовуються в різних областях науки, медицині, техніки та ветеринарії. Вони лежать в основі виготовлення надчутливих рідкокристалічних термоіндикаторних плівок для годинників, мінікалькуляторів, можуть бути використані в якості електрооптичних матеріалів для пристроїв відображення інформації, а також активно використовуються в термографії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- виготовлення двох типів зразків на основі сумішей рідких кристалів, сажі та полімеру;
- експериментальне дослідження частотних залежностей опору та ємності;

- дослідження селективного розсіювання світла плівки з індукованої холестеричною спіраллю. Аналіз результатів, отриманих чисельними методами;

- експериментальне дослідження термооптичних властивостей термоіндикаторних плівок.

## **РОЗДІЛ II ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ**

Холестеричні рідкі кристали давно і широко застосовуються в наукових і практичних цілях. Однак їх електрофізичні властивості, зокрема, провідність (опір) і діелектрична проникність (ємність) ще недостатньо глибоко і систематично вивчені, хоча відома їх вирішальна роль в електрооптичних та інших ефектах.



## 2.1 Методика виготовлення рідкокристалічних плівок

Для приготування дисперсій холестеричних сумішей в полімерній матриці ми використовували водорозчинний полівінілацетат. Перед змішуванням з рідким кристалом ПВА розчинявся у воді. Для створення зразків переважно використовувався 20% розчин ПВА у воді. На наступному етапі в водний розчин ПВА ми додавали 25% (відносно маси полімеру) вуглецевої сажі. Утворена суміш біля 30 хвилин перемішувалась за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т.

Потім суміш нагрівалась до температури 50°C і в неї додавалась суміш рідких кристалів. Для експериментів ми використовували два типи сумішей. Суміш холестеричних рідких кристалів типу 1 була розрахована на діапазон температур, які відповідають нормальній температурі людського тіла (36,6°C). Суміш холестеричних рідких кристалів типу 2 була розрахована на діапазон температур, які відповідають підвищеній температурі людського тіла (38°C).

Після внесення суміші холестеричних рідких кристалів у водний розчин полімеру з сажею, утворена суміш біля 60 хвилин перемішувалась за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т при температурі 50°C. На основі отриманих розчинів за допомогою спеціального пристрою формувались плівки на поверхні скла. Після висихання розчинника полімеру (води) на скляній поверхні утворювались плівки з диспергованим рідким кристалом у полімерній матриці двох типів (Рис. 2.1.1).

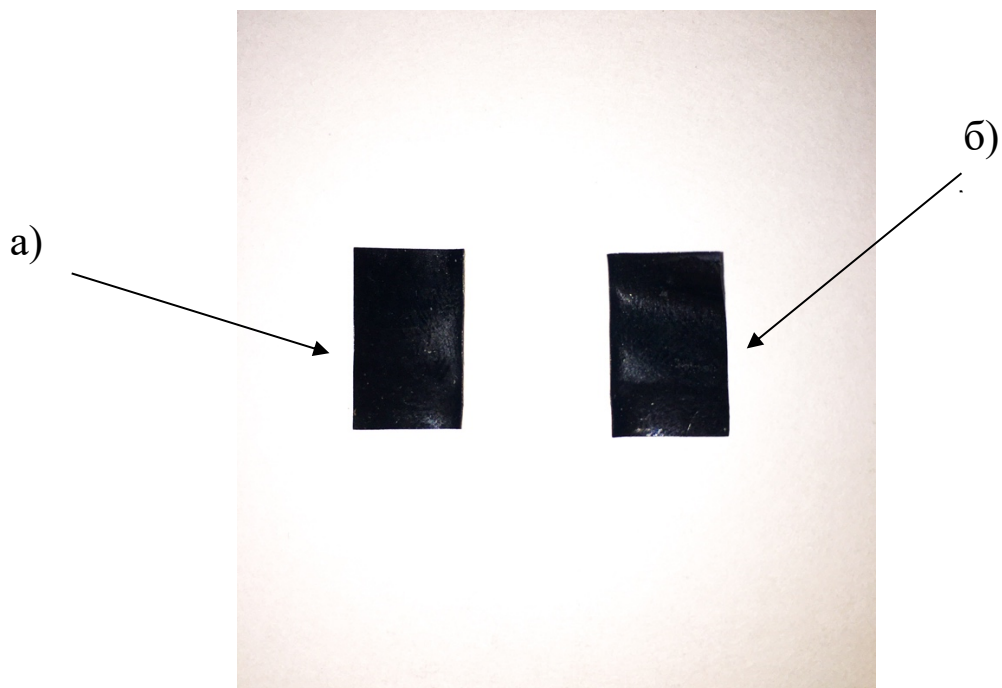


Рисунок 2.1.1. Рідкокристалічні термоіндикаторні плівки: 1 типу, яка розрахована на діапазон температур, що відповідають нормальній температурі людського тіла (a) , плівка типу 2, яка розрахована на діапазон температур, що відповідають підвищеній температурі людського тіла (б).

## 2.2 Вимірювання частотних залежностей опору та ємності

Ємність  $C$  та опір  $R$  зразків ми вимірювали за допомогою осцилоскопічного методу. Блок - схема пристрою для вимірювання ємності  $C$  та опору  $R$  на ділянці частот  $10\text{--}10^6$  Гц показана на рис. 2.2.1. Основним елементом пристрою був генератор сигналів ГЗ-112.

Сигнал від ГЗ-112 подавався на зразок. На схемі він зображений як паралельно з'єднані опір та ємність. Послідовно зі зразком підключався опір  $R_N$ . Величину цього опору можна було змінювати в межах від кількох Ом до сотні  $\kappa\text{Ом}$  (фактично це був магазин опорів). Напряга з опору  $R_N$  подавалась на Y-координату осцилографа С1-83, який працював в режимі осцилоскопа. В такому режимі відключалась напруга розгортки і на X-координату осцилографа подавалась напруга безпосередньо від генератора. Тобто фактично осцилограф працював в режимі самописця.

Подаючи змінну напругу різної низької частоти, було записано динамічні вольт-амперні характеристики, за якими визначали  $C$  та  $R$ .

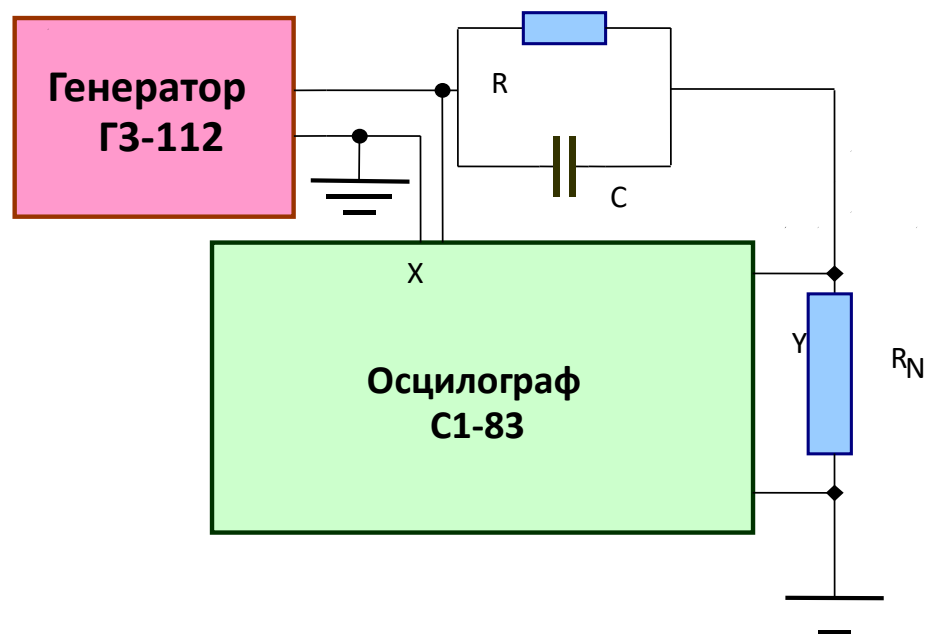


Рисунок 2.2.1. Блок-схема пристрою для вимірювання ємності  $C$  та опору  $R$  в діапазоні частот  $10\text{--}10^6$  Гц.

У випадку напруги, яка змінювалась за синусоїдальним законом (змінну напругу саме такої форми давав генератор) на екрані осцилографа отримували переважно фігури у вигляді еліпса. Для пояснення, чому саме отримується така картина, проаналізуємо проходження струму через зразок. Для аналізу виберемо певне конкретне значення напруги  $U_x$ .

Тоді при наростанні напруги струм, який проходить через зразок, буде описуватись співвідношенням:

$$I_1 = \frac{U_x}{R} + C \frac{dU}{dt}, \quad (2.2.1)$$

а при спаданні напруги з часом:

$$I_2 = \frac{U_x}{R} - C \frac{dU}{dt}, \quad (2.2.2)$$

Віднімаючи або додаючи дані значення струмів, для даної напруги  $U_x$  можна отримати відповідно величину  $C$  або  $R$ .

Для сигналу синусоїдального форми:

$$U = U_0 \sin(\omega t), \quad (2.2.3)$$

де  $U_0$  – величина амплітуди вимірювального сигналу,  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота.

Шляхом математичних перетворень було отримано співвідношення для ємності :

$$C = \frac{\Delta U_C}{4\pi f R_N \sqrt{U_0^2 - U_x^2}}, \quad (2.2.4)$$

та опору

$$R = 2R_N \frac{U_x}{\Delta U_R}. \quad (2.2.5)$$

Оскільки отримані величини  $C$  та  $R$  залежали від геометричних розмірів зразків (товщини  $d$  та площі  $S$ ) то ми також визначали діелектричну проникність та провідність:

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}, \quad (2.2.6)$$

де  $\varepsilon_0$  - електрична стала.

$$\sigma = \frac{d}{SR} \quad (2.2.7)$$

Електричні властивості зразків досліджувались при кімнатній температурі і при температурі, при якій спостерігається селективне відбивання світла у видимому людським оком діапазоні довжин хвиль (коли при зміні температури зразок змінював колір від фіолетового до червоного). Для цього використовувався термостабілізатор, який дозволяв підтримувати температуру в середині діапазону температур де колір змінювався від фіолетового до червоного (в середньому це відповідало температурі коли зразок мав зелений колір).

## 2.2.1 Результати експерименту

Отримані експериментальні результати для двох типів зразків та двох різних температур наведені у таблицях 2.2.1.1 – 2.2.1.4. Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми становила 1,0 В, напруга, при якій проводились вимірювання - 0,4 В, товщина зразка - 0,15 мм.

Таблиця 2.2.1.1. Електричні властивості зразка №1 при температурі 17,7 °С.

$f$ , Гц	$R_N$ , кОм	$\Delta U(C)$ , мВ	$\Delta U(R)$ , мВ
100	105	7,5	1
150	--	10	1,5
200	--	12,7	1,75
300	--	17,5	2,7
500	--	26,5	3,8
700	--	35	4,5
1000	--	48	5,5
1500	--	68,5	8,5
1500	31,2	23	2,1
2000	--	30,5	2,6
3000	--	45	3,1
5000	--	73	3,5
5000	10,4	26	1
7000	--	35,5	1,5
10000	--	50	2,7
15000	--	72	3,3
15000	3,12	22,5	0,9
20000	--	30	1
30000	--	44	2
50000	--	70	4
50000	1,03	24,5	1,3
70000	--	33,5	1,5
100000	--	46	2,5
150000	--	66,5	5

150000	0,315	21	1,5
200000	--	28	2
300000	--	41	2,3
300000	0,105	14	0,7
500000		23	1
700000		31,5	1,5

Таблиця 2.2.1.2. Електричні властивості зразка №1 при температурі 36,8 °С.

$f$ , Гц	$R_N$ , кОм	$\Delta U(C)$ , мВ	$\Delta U(R)$ , мВ
10	105	5	25
15	--	5,5	22
20	--	6,5	21
30	--	8,5	20
50	--	12	19,8
70	--	15	19,7
100	--	19	19,5
150	--	24	20
200	--	28,5	20,5
300	--	36,5	21
500	--	50,5	23,5
700	--	62	25
700	31,5	22	8
1000	--	29	11
1500	--	40	16
2000	--	50	20
3000	--	71	25
3000	10,4	26,5	8
5000	--	41,5	8,5
7000	--	53	9
10000	--	87	10
10000	3,12	23	3
15000	--	35	3,5
20000	--	45	4
30000		66	5
30000	1,03	21,5	1,5
50000	--	36	2

70000	--	50,5	3,5
100000		70	5
100000	0,315	21,5	1,5
150000	--	32	2
200000	--	41,5	2,5
300000	--	61	3
300000	0,105	20,5	1
500000		34	1,5
700000		47	2

У таблицях 2.2.1.3 – 2.2.1.4 величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми становила 1,0 В, напруга, при якій проводились вимірювання - 0,4 В, товщина зразка - 0,2 мм.

Таблиця 2.2.1.3. Електричні властивості зразка №2 при температурі 17,6 °С.

$f$ , Гц	$R_n$ , кОм	$\Delta U(C)$ , мВ	$\Delta U(R)$ , мВ
100	105	10	5
150	--	13	5,5
200	--	16,5	6,5
300	--	23	7
500	--	35	8
700	--	47,5	9,5
1000	--	65	11
1000	31,2	22	3,2
1500		33,5	3,6
2000	--	43	4,1
3000	--	64	6
3000	10,4	22	2
5000	--	36	2,2
7000	--	50,5	2,6
10000	--	70	3
10000	3,12	21	0,9
15000	--	32,3	1,1
20000	--	42	1,5
30000	--	62,5	2,5



30000	1,03	21	0,8
50000	--	35	1
70000	--	48	1,6
100000	--	67	2
100000	0,315	21	0,7
150000	--	30,5	1
200000	--	40	1,2
300000	--	58,5	1,5
300000	0,105	20	0,5
500000		32	0,7
700000		43,5	1,3
1000000		67,5	2,5

Таблиця 2.2.1.4. Електричні властивості зразка №2 при температурі 38,5 °С.

$f$ , Гц	$R_n$ , кОм	$\Delta U(C)$ , мВ	$\Delta U(R)$ , мВ
10	31,2	25,5	2,5
15	--	25	2,6
20	--	24,5	2,7
30	--	24	2,8
50	--	23,5	3
70	--	23,2	4
100	--	23	5
150	--	22,5	7,5
200	--	21,5	9,5
300	--	20,5	12
500	--	21,5	20
700	--	26	21
1000	--	34	22
1500	--	49	22,5
2000	--	64	24
2000	10,4	23,5	6,5
3000	--	34	7
5000	--	54	7,5
7000	--	76	8
7000	3,12	22,5	2,5
10000	--	31	3

15000	--	47	5
20000	--	62,5	6,5
20000	1,03	21	2
30000	--	31,5	2,5
50000	--	51	3
70000	--	70,5	3,5
70000	0,315	21,5	1
100000	--	30	1,2
150000	--	43	1,5
200000	--	57,5	1,8
200000	0,105	19	0,6
300000		28	0,8

## 2.2.2 Обробка експериментальних результатів

Обробка експериментальних результатів проводилась для кожної температури і для кожного із зразків з використанням наведених в таблицях 2.2.1.1 – 2.2.1.4 даних на основі співвідношень 2.2.4 - 2.2.7. Для того щоб краще можна було аналізувати отримані частотні залежності нижче вони наведені у вигляді графіків.

Частотні залежності ємності зразків. Ємність зразків була розрахована на основі співвідношення 2.2.4. Нижче (на рис. 2.2.2.1 та рис. 2.2.2.2) наведені частотні залежності ємності для кожного із зразків (1 – зразок першого типу та 2 – другого типу) при двох різних величинах температури.

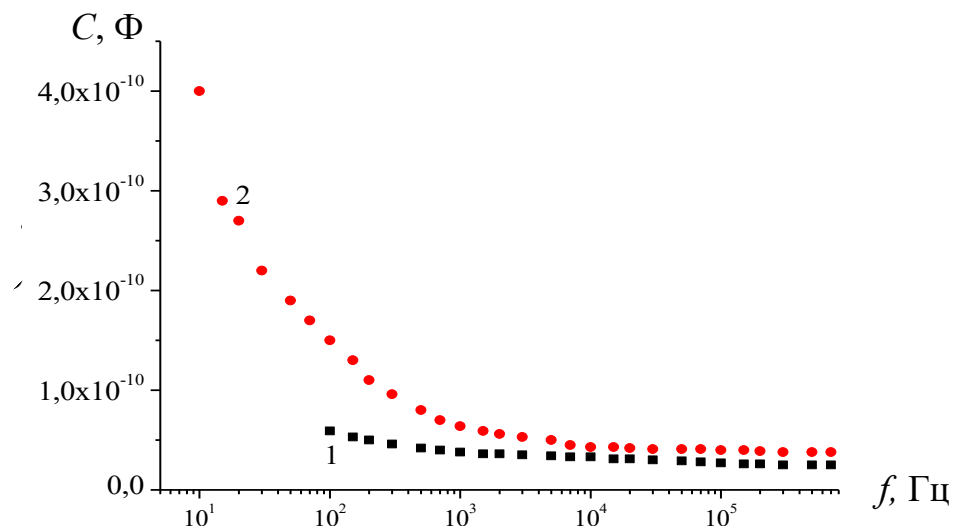


Рис. 2.2.2.1. Частотні залежності ємності зразка 1 при температурах 17,7 °C (крива 1) та 36,8 °C (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми 1,0 В. Напруга, при якій проводились вимірювання 0,4 В, товщина зразка 0,15 мм.

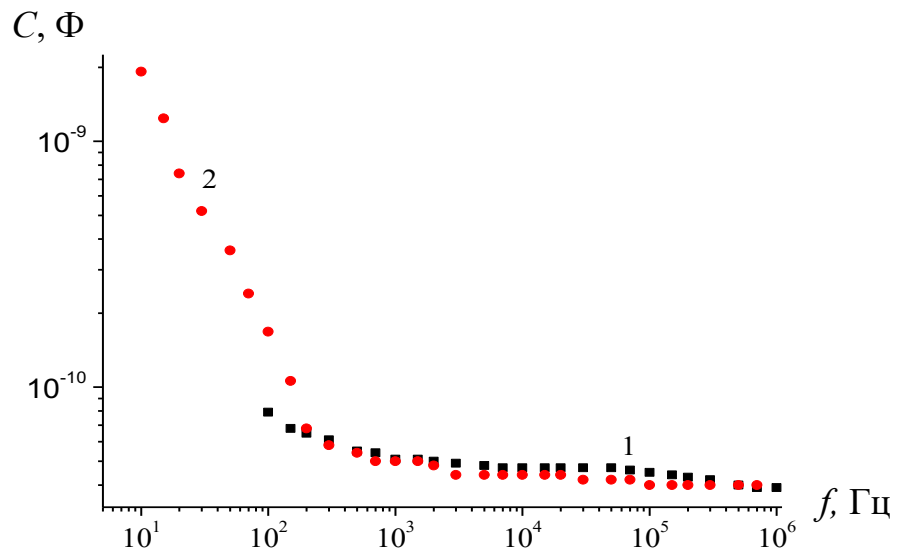


Рис. 2.2.2.2. Частотні залежності ємності зразка 2 при температурах 17,6 °С (крива 1) та 38 °С (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми 1,0 В. Напруга, при якій проводились вимірювання 0,4 В, товщина зразка 0,2 мм.

Із аналізу рис. 2.2.2.1 та рис. 2.2.2.2 можна зробити наступні висновки:

1. Найбільш суттєва різниця між частотними залежностями ємності, отриманими для конкретного зразка при різних величинах температури спостерігається при частотах менше  $10^3$  Гц.
2. Найбільш суттєва різниця в частотних залежностях ємності між зразками 1 (рис.2.2.2.1) та 2 (рис.2.2.2.2) спостерігається при частотах більше  $10^3$  Гц.

Частотні залежності опору зразків. Опір зразків була розрахований на основі співвідношення 2.2.5. Нижче (на рис. 2.2.2.3 та рис. 2.2.2.4) наведені частотні залежності опору для кожного із зразків при двох різних величинах температури.

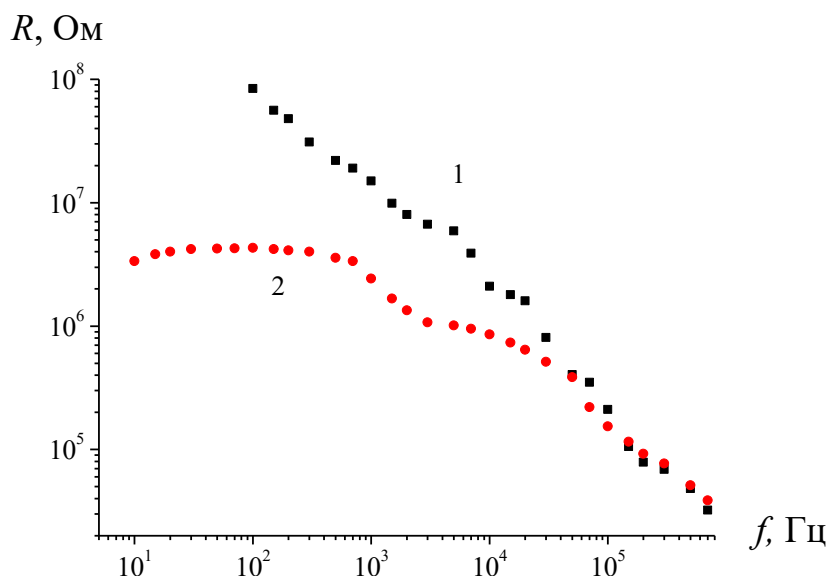


Рис. 2.2.2.3. Частотні залежності опору зразка 1 при температурах 17,7 °С (крива 1) та 36,8 °С (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми 1,0 В. Напруга, при якій проводились вимірювання 0,4 В, товщина зразка 0,15 мм.

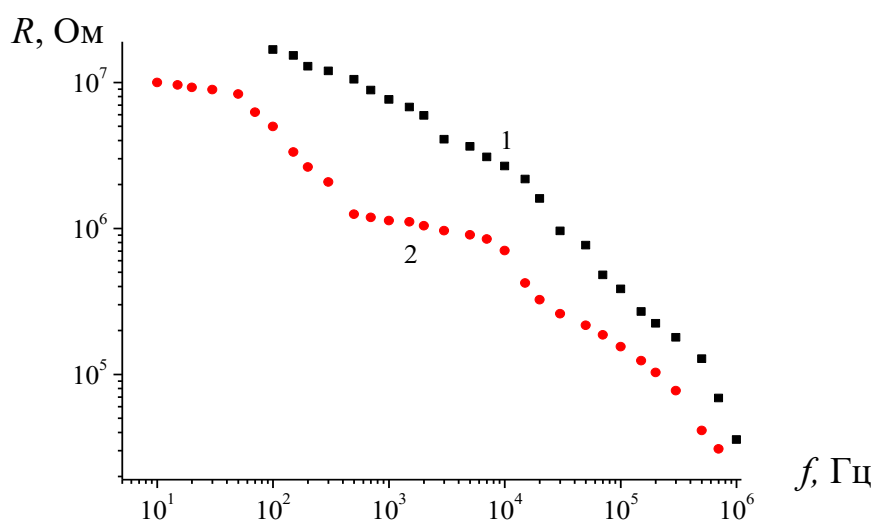


Рис. 2.2.2.4. Частотні залежності опору зразка 2 при температурах 17,6 °С (крива 1) та 38 °С (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми 1,0 В. Напруга, при якій проводились вимірювання 0,4 В, товщина зразка 0,2 мм.

Із аналізу рис. 2.2.2.3 та рис. 2.2.2.4 можна зробити наступні висновки:

1. Найбільш суттєва різниця між частотними залежностями опору отриманими для конкретного зразка при різних величинах температури спостерігається при самих низьких частотах і зменшується з ростом частоти.

2. Найбільш суттєва різниця в частотних залежностях опору між зразками 1 (рис. 2.2.2.3) та 2 (рис.2.2.2.4) спостерігається при частотах більше  $10^4$  Гц (у випадку зразка 1 дані практично співпадають, а у зразку 2 є різниця у величині опору для всього діапазону температур).

Частотні залежності діелектричної проникності зразків. Величина ємності не є характеристикою речовини. Такою характеристикою є діелектрична проникність  $\epsilon$ . За відомими геометричними параметрами зразка величину  $\epsilon$  на основі відомих геометричних параметрів зразків (товщини та площі) ми визначали за співвідношенням 2.2.6. Частотні залежності  $\epsilon$  для двох зразків при двох різних температурах наведені на рис. 2.2.2.5 та рис. 2.2.2.6.

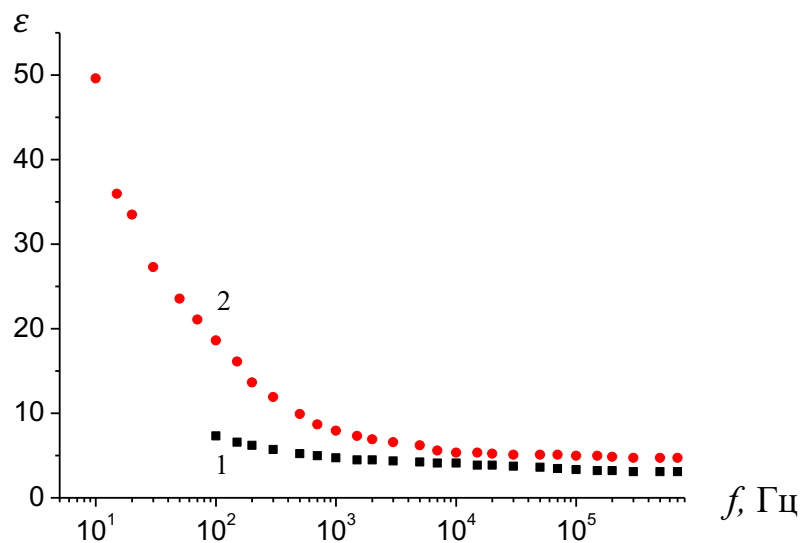


Рис. 2.2.2.5. Частотні залежності діелектричної проникності  $\epsilon$  зразка 1 при температурах 17,7 °C (крива 1) та 36,8 °C (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми 1,0 В. Напруга, при якій проводились вимірювання 0,4 В, товщина зразка 0,15 мм.

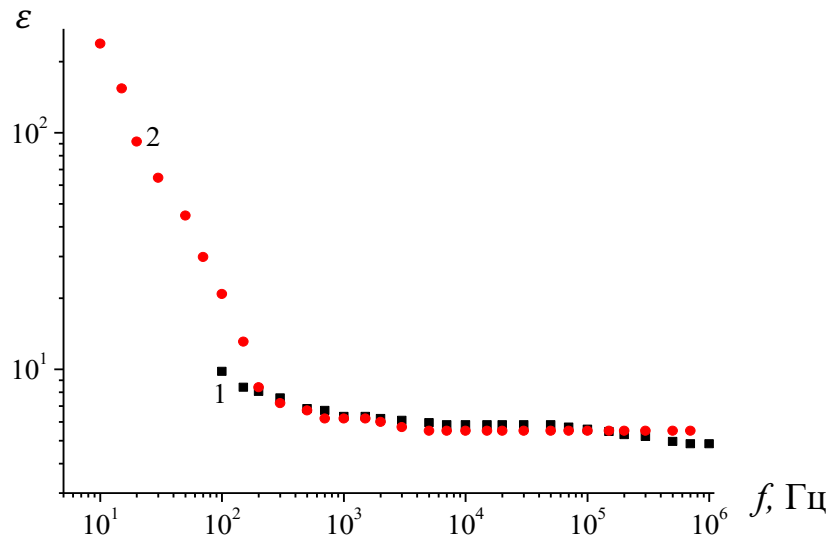


Рис. 2.2.2.6. Частотні залежності діелектричної проникності  $\epsilon$  зразка 2 при температурах 17,6 °C (крива 1) та 38 °C (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми 1,0 В. Напруга, при якій проводились вимірювання 0,4 В, товщина зразка 0,2 мм.

Порівнюючи рис. 2.2.2.5 та рис. 2.2.2.6 можна зробити ті ж самі висновки, що і при порівнянні ємності зразків. Важливо тільки пояснити досить великі величини  $\epsilon$  при низьких частотах. Це можна пояснити тим, що при таких низьких частотах електричне поле в зразку стає неоднорідним. Більша частина напруги вимірювального сигналу в такому випадку прикладена до приелектродних ділянок зразка.

Частотні залежності провідності зразків. Як і ємність опір зразка теж не є характеристикою матеріалу, тому що залежить від його геометричних параметрів. Тому ми провели аналіз також для величини провідності, яку визначали на основі співвідношення 2.2.7. Частотні залежності провідності  $\sigma$  для двох зразків при двох різних величинах температури наведені на рис. 2.2.2.7 та рис. 2.2.2.8.

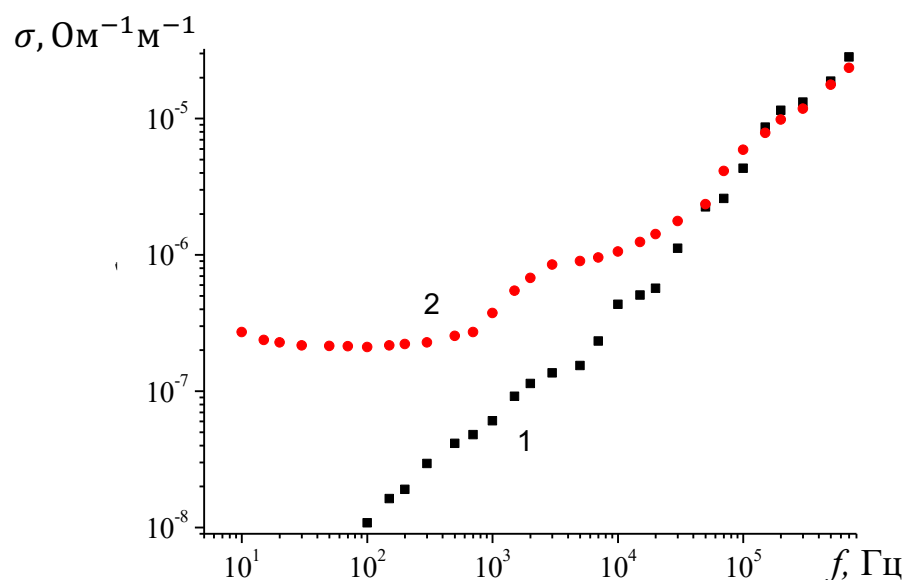


Рис. 2.2.2.7. Частотні залежності електричної провідності  $\sigma$  зразка 1 при температурах  $17,7^\circ\text{C}$  (крива 1) та  $36,8^\circ\text{C}$  (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми  $1,0\text{ В}$ . Напруга, при якій проводились вимірювання,  $0,4\text{ В}$ , товщина зразка  $0,15\text{ мм}$ .

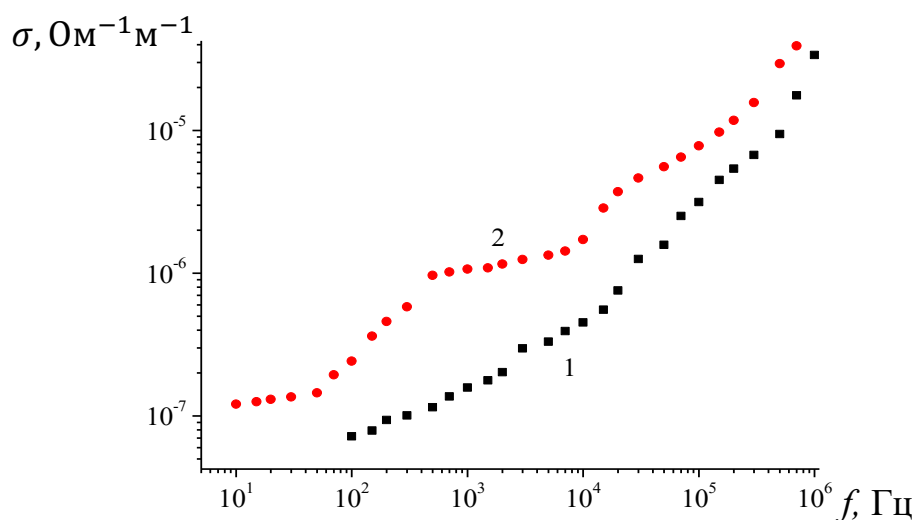


Рис. 2.2.2.8. Частотні залежності електричної провідності  $\sigma$  зразка 2 при температурах  $17,6^\circ\text{C}$  (крива 1) та  $38^\circ\text{C}$  (крива 2). Величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми  $1,0\text{ В}$ . Напруга, при якій проводились вимірювання  $0,4\text{ В}$ , товщина зразка  $0,2\text{ мм}$ .



Порівнюючи рис. 2.2.2.5 та рис. 2.2.2.6 можна зробити ті ж самі висновки, що і при порівнянні електричних опорів зразків. Важливо тут відмітити, що при високих частотах (більше  $10^5$  Гц) в частотних залежностях провідності для різних зразків при різних температурах спостерігається не суттєва різниця. Така різниця стає суттєвою при малих частотах (сотні Гц та менше). Причиною цього є те, що для таких частот, саме коли холестеричний рідкий кристал переходить з твердої в рідкокристалічну фазу, суттєвий внесок у загальну провідність крізь зразок дає провідність крізь рідкий кристал.

Частотна залежність відношення діелектричних проникностей при різних температурах для двох типів зразків. На рис.2.2.2.5 та рис. 2.2.2.6. були наведені відмінності між частотними залежностями діелектричної проникності  $\epsilon$  для двох величин температур в залежності від типу зразка (1 чи 2). Для кращого аналізу різниці таких залежностей по відношенню до типу зразка (1 чи 2) логічно порівняти частотні залежності відношення величин  $\epsilon$  (при температурі де плівка стає кольоровою  $\epsilon_L$  до величини діелектричної проникності при кімнатній температурі  $\epsilon_K$ ) для кожного із зразків. Отримані залежності наведені для кожного із типів зразків наведені на рис. 2.2.2.9.

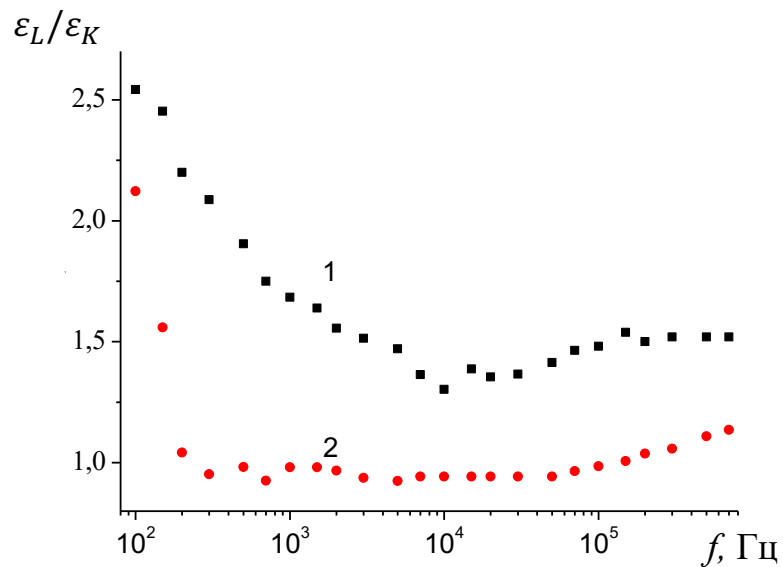


Рис. 2.2.2.9. Частотні залежності відношення  $\epsilon_L/\epsilon_K$  (діелектричної проникності при температурі коли плівка стає кольоровою до діелектричної проникності при кімнатній температурі) для двох типів зразків: для зразка 1 (крива 1) та зразка 2 (крива 2).

Для аналізу відмінностей між кривими 1 та 2 слід ще раз відмітити, що для їх виготовлення використовувався один і той же полімер. Вміст вуглецевої сажі та рідкого кристалу в кожному із зразків був одним і тим же. Тому можна зробити однозначний висновок, що різниця між кривими 1 та 2 зумовлена саме відмінностями у властивостях введених у полімер рідкокристалічних сумішей.

Оскільки крім діелектричної проникності ми також визначали опір зразків, то важливо в'яснити чи відображена на рис.2.2.2.9 різниця між діелектричними проникностями зразків 1 та 2 буде проявлятися для частотних залежностей провідності цих зразків. Така залежність розглянута нижче.

Частотна залежність відношення провідностей при різних температурах для двох типів зразків.

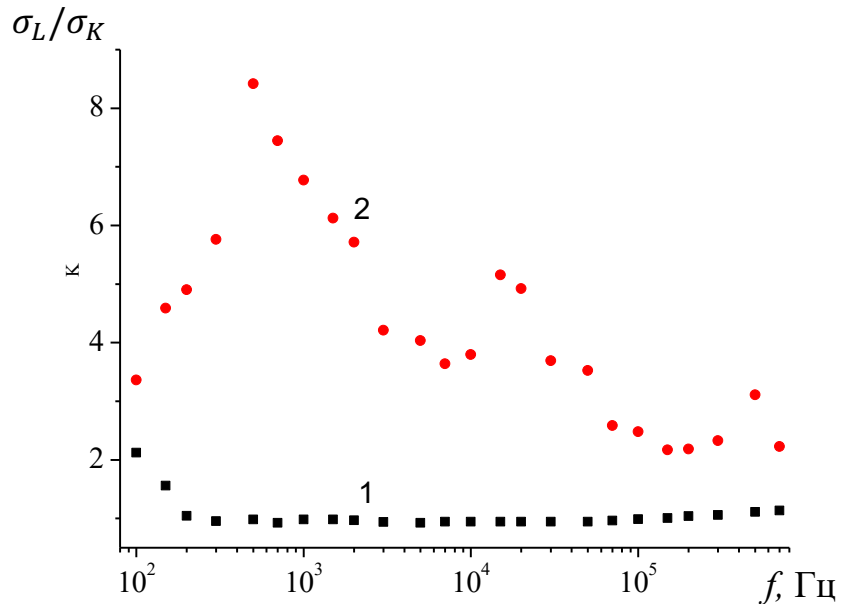


Рис. 2.2.2.10. Частотні залежності відношення  $\sigma_L/\sigma_K$  (електричної провідності при температурі коли плівка стає кольоровою  $\sigma_L$  до електричної провідності при кімнатній температурі  $\sigma_K$ ) для двох типів зразків: для зразка 1 (крива 1) та зразка 2 (крива 2).

Із рис. 2.2.2.10 випливає, що відмінність між зразками 1 та 2 для частотних залежностей відношення  $\sigma_L/\sigma_K$  також спостерігається. Причому вона є значно більшою ніж у випадку відношення  $\epsilon_L/\epsilon_K$ . Така відмінність, як і у випадку зображеної на рисунку 9, зумовлена впливом саме рідкого кристалу.

## 2.3 Електрооптика холестериків

За деякими класифікаціями холестерики і нематики зараховують до одного класу рідких кристалів. На молекулярному рівні вони мають однакову молекулярну упаковку, але в холестериках директор від шару до шару змінює свою орієнтацію, утворюючи холестеричну спіраль [26 - 30]. Всі специфічні властивості холестериках, які відрізняють їх від нематиків, пов'язані зі спіральною закрученістю холестериків. Доведено, що спонтанне закручування молекул в холестериках викликається дуже слабкими міжмолекулярними силами. Енергія закручування холестерика на п'ять порядків менше енергії спонтанної орієнтаційної впорядкованості нематика. Тому крок спіралі легко змінюється або шляхом незначних зовнішніх впливів (температура, поле), або введенням в рідкий кристал певних домішок. Нематик можна легко закрутити або механічним способом (твіст-структура), або шляхом введення в нього оптично активних добавок (мезогенних або немезогенних). Холестерик, навпаки, може перетворитися в нематик або в суміші двох холестериках з різними знаками спіралі, або під дією зовнішнього поля (електричного, магнітного). Тому холестерик можна вважати закрученим нематиком, а нематик - холестериком з нескінченним кроком спіралі. Суміші холестериків, або нематиків з оптично активними добавками можуть мати практично будь-який крок спіралі. Це дало можливість створити холестерики з кроком спіралі від долі мікрометра до нескінченності [33 - 35].

Холестерики, як і нематики, характеризуються анізотропією всіх фізичних параметрів.: діелектричною  $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ , електропровідності  $\Delta\sigma = \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$  та оптичною  $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  причому індекси  $\parallel$  і  $\perp$  означають паралельні і перпендикулярні директору напрямки, а не осі холестеричної спіралі.

Електрооптичні ефекти в холестериках можна розділити на два основних види:

- 1) чистопольові електрооптичні ефекти, коли електричне поле безпосередньо діє на директор, викликаючи колективну переорієнтацію молекул (діелектричний механізм);
- 2) електрогідродинамічні ефекти, пов'язані з протіканням електричного струму.

Однак електрооптичні ефекти в холестериках через спіральність структури значно складніші, ніж в нематика. Якщо, наприклад, в чистопольових ефектах нематиків структурні зміни в електричному полі зводяться до простої переорієнтації директора, то зміна структури холестерика пов'язана з поворотами осі спіралі і розкручуванням її електричним полем. Внаслідок періодичної структури холестериків в них спостерігаються також і більш тонкі електрооптичні ефекти. Переорієнтація осі холестеричної спіралі є повною аналогією переходів Фредерікса в нематиків, оскільки оптична вісь в холестериках збігається з віссю спіралі.

Переходи Фредерікса в холестериках не змінюють кроку спіралі, а лише призводять до текстурних переходів, при яких змінюються оптичні властивості холестерика. Електрогідродинамічні ефекти в холестериках теж складніші, ніж в нематика, і більш різноманітні.

Детальної класифікації електрооптичних ефектів в холестериків не існує. Тип ефекту залежить від вихідної текстури холестерика, знака діелектричної анізотропії, напрямку електричного поля щодо осі холестеричної спіралі і величини цього поля. Деякі електрооптичні ефекти в холестериках добре вивчені. Це текстурні переходи при різних геометріях досліду, розкрутка спіралі і деякі типи електрогідродинамічних ефектів, в т.ч. ефект динамічного розсіювання світла з «пам'яттю».

Більшість електрооптичних ефектів досліджують в електрооптичних комірках типу «сендвіч»: рідкий кристал розміщують між двома плоскопаралельними скляними пластинками з прозорими електродами на

внутрішніх поверхнях, відстань між якими фіксується діелектричними прокладками. Ця відстань становить  $100 \div 200$  мкм. Використовують також електрооптичні комірки з електродами, які створюють електричне поле, паралельне до площин осередки (поверхнева осередок).

Електрооптичні ефекти в холестериках відбуваються в електричних полях, більших деякого порогового значення. Граничне поле обернено пропорційне початковому кроку спіралі. Тому для отримання доступних для експериментів напруг переорієнтації використовують холестерико-нематичні суміші з великим кроком спіралі ( $P \approx 10$  мкм). При цьому знак діелектричних анізотропії суміші визначає нематик (концентрація хіральних добавок незначна). Для чистопольових електрооптичних ефектів використовують змінні електричні поля, щоб унеможливити перенесення заряду і електрогідродинамічної нестійкості. Такі поля можуть повертати вісь спіралі, деформувати її і навіть розкрутити. Всі чистопольові електрооптичні ефекти мають магнітні аналоги.

Розглянемо електрооптичні ефекти в ХРК, пов'язані зі зміною орієнтації директора. Причому середнє значення електропровідності  $\sigma$  ХРК настільки невелике (або частота електричного поля велика), що орієнтацією молекул електричним струмом можна знехтувати і розглядати взаємодію між ХРК і електричним полем як чисто діелектричну. Орієнтація ХРК в електричному полі  $E$  відбувається таким чином, щоб мінімізувати вільну енергію в поле. До щільності вільної енергії ХРК:

$$F = F_0 + F_{el}, \quad (2.3.1)$$

де  $F_0$  - щільність вільної енергії недеформованого ХРК,  $F_{el}$  - щільність вільної енергії, пов'язана з деформаціями і визначається як:

$$F_{el} = \frac{1}{2} [K_{11}(\text{div}n)^2 + K_{22}(n \cdot \text{rotn} + t_0)^2 + K_{33}(n \times \text{rotn})^2], \quad (2.3.2)$$

додається величина:

$$F_e = -\frac{1}{2}\Delta\epsilon\epsilon_0(nE)^2, \quad (2.3.3)$$

і  $F = F_0 + F_{el} + F_e$ , де  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  - константи пружності поперечного вигину, кручення і поздовжнього вигину відповідно,  $t_0 = 2\pi/p$  - параметр, що описує спіральне закручування за відсутності зовнішніх деформацій,  $p$  - крок спіралі.

Оскільки  $F_e$  залежить від взаємної орієнтації  $n$  і  $E$ , при заданому  $E$  директор  $n$  може змінюватися, мінімізуючи загальну вільну енергію. Якщо ХРК має  $\Delta\epsilon > 0$ , то  $F_e$  буде максимальним (загальна вільна енергія мінімальна), коли молекули розташовуються уздовж напрямку поля, відповідно, вісь спіралі перпендикулярно полю.

Ці текстурні зміни в ХРК призводять до істотної зміни оптичних властивостей орієнтованого шару ХРК, розташованого між двома паралельними обмежувальними поверхнями.

У планарній текстурі ХРК з великим кроком спіралі і з  $\Delta\epsilon > 0$ , коли електричне поле прикладається паралельно осі спіралі, спостерігається поява двовимірної просторово-періодичної деформації, що має вигляд квадратної сітки. Сторона квадратної сітки пропорційна  $\sim\sqrt{dp}$ , де  $d$  - товщина комірки, тобто шару ХРК,  $p$  - рівноважний крок спіралі [36].

Діелектричний момент прагне переорієнтувати молекули в положення, яке відповідає текстурі «відбитків пальців». З іншого боку, пружні сили прагнуть зберегти початкове (без поля) розташування холестеричних шарів. При не дуже великих полях компромісним варіантом виявляється хвилеподібна картина розподілу директора. Хвильовий вектор цієї деформаційної картини по осі  $z$  приблизно дорівнює  $\pi/d$ . З двовимірною деформаційною картиною пов'язана двовимірна періодичність в розподілі коефіцієнта заломлення і фазової затримки між незвичайним і звичайним

променями, звідси - сітка. Зі збільшенням напруги, кут відхилення директора збільшується, намагаючись досягти значення до  $\theta = 90^\circ$  по всьому зразку [37].

Граничне поле утворення двовимірної періодичної деформації може бути визначено виходячи з виразу для вільної енергії ХРК за умови мінімуму вільної енергії ХРК. Передбачається, що товщина  $d$  зразка велика, тобто  $d > p$ , а відхилення осі холестеричної спіралі від нормалі до скла, обмежуючого зразок, невелике. Тоді, згідно [38]:

$$E^2 = \frac{2\pi^2 \sqrt{6K_{22}K_{33}}}{\Delta\epsilon\epsilon_0 p d}, \quad (2.3.4)$$

за умови малої  $\Delta\epsilon$ . Граничне електричне поле не залежить від частоти аж до області дисперсії діелектричних постійних.

Коли величина напруженості прикладеного поля збільшується, відбувається розкрутка холестеричної спіралі (перехід Фредерікса). Необхідною умовою польового розкручування ХРК є перпендикулярність електричного поля положенню осі холестеричної спіралі [39]. В інших випадках, спочатку відбувається поворот осі спіралі, а потім вже процес розкрутки ХРК, і при значенні напруженості поля, що перевищує порогове значення, молекули ХРК шикуються паралельно полю (ефект спостерігається для ХРК з  $\Delta\epsilon > 0$ ). Повне розкручування спіралі настає при критичному значенні напруженості поля:

$$E_c = \frac{\pi^2}{2p} \sqrt{\frac{K_{22}}{\Delta\epsilon\epsilon_0}}. \quad (2.3.5)$$

Причому час відгуку  $\tau_r$  ( $\tau_{on}$ ) і релаксації  $\tau_d$  ( $\tau_{off}$ ) на прикладення електричного поля мають вигляд:



$$\tau_r = \frac{\gamma_1 p^2}{K_{22} \pi^2}, \tau_d = \frac{\gamma_1}{\Delta \varepsilon E^2 / 4\pi - K_{22} \pi^2 / p^2}, \quad (2.3.6)$$

де  $\gamma_1$  - оберտальна в'язкість ХРК.

## ВИСНОВКИ ДО II РОЗДІЛУ

1. На основі сумішей рідких кристалів, сажі та полімеру виготовлені два типи зразків: зразки типу 1, які змінюють колір при нормальній температурі людського тіла та зразки типу 2, які змінюють колір при підвищеній температурі людського тіла.

2. Досліджено частотні залежності діелектричної проникності (ємності) зразків при різних температурах. Показано, що найбільша відмінність величини діелектричної проникності (ємності) спостерігається при частотах менших 100 Гц і зумовлена впливом приелектродних явищ.

3. Досліджено частотні залежності провідності (опору) зразків. Показано, що відношення провідностей при різних температурах (провідності при температурі де плівка змінює колір до провідності при кімнатній температурі) для зразків двох типів є значно більшою ніж відношення діелектричних проникностей. Досліджено, що різниця в електричних параметрах зразків двох типів зумовлена саме холестеричним рідким кристалом.

4. Розглянуто електрооптичні ефекти в ХРК, пов'язані зі зміною орієнтації директора.

### **РОЗДІЛ III ТЕРМООПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ**

Холестеричні рідкі кристали, завдяки своїм термо- та електрооптичним ефектам, мають важливі практичні застосування, пов'язані переважно з вимірюванням температури: в термографії і медичній діагностиці, неруйнівному контролі виробів, як реєстратори інфрачервоного і надвисокочастотного випромінювання.

### 3.1 Дослідження селективного розсіювання світла

Специфічні оптичні властивості холестериків, якими вони відрізняються від нематиків, є наслідком їх спіральної структури. Ці властивості досліджують на орієнтованих шарах холестериків з планарною текстурою. Планарній текстурі холестериків притаманні унікальні оптичні ефекти. Планарна текстура має аномально високу оптичну активність, яка досягає значень  $\varphi = 10^4 \div 10^5$  град/мм. Для порівняння: оптична активність кварцу, яку вважають високою, становить 24 град/мм.

Кут повороту площини поляризації холестериків сильно залежить від довжини світлової хвилі. При цьому спостерігається аномальна дисперсія оптичної активності і при деякій довжині хвилі відбувається зміна її знака. Довжину хвилі, при якій оптична активність перетворюється в нуль, називають точкою інверсії. Вона дорівнює  $\lambda_i = P \cdot \bar{n}$ , де  $P$  - крок гвинта,  $\bar{n}$  - середній показник заломлення холестерика. По обидва боки від точки інверсії напрямки повороту площини поляризації протилежні. Оптична активність звичайних оптично активних середовищ має певний знак незалежно від  $\lambda$ , тобто вони є правообертаючі, або лівообертаючі [40].

В області інверсії оптичної активності спостерігається селективне відбивання світла планарною текстурою холестерика. Його особливістю є те, що воно відбувається в інтервалі довжин хвиль  $\lambda$  поблизу  $\lambda_i$ . Цей інтервал  $\Delta\lambda$  називають областю селективного відбивання. Графіки дисперсії оптичної активності та селективного відбиття світла планарною текстурою холестерика зображені на рис. 3.1.1. Довжина хвилі відбитого світла залежить від кута падіння. Відбите світло поляризоване по колу того ж знака, що і холестерична спіраль. Якщо, наприклад, холестерична спіраль права, то відбивання зазнає світла правої кругової поляризації. При звичайному відбиванні, наприклад від металевого дзеркала, правополяризоване світло стає лівополяризованим, і навпаки. При відбиванні від холестеричного шару

знак кругової поляризації не змінюється: права поляризація залишається правою, а ліва - лівою. Світло протилежної кругової поляризації вільно проходить через шар холестерика практично без ослаблення. Явище різного поглинання світла з правою і лівою поляризацією називають круговим дихроїзмом. Він залежить від довжини хвилі падаючого світла і буде найбільшим в тому разі, коли довжина хвилі в холестериках близька до кроку холестеричної спіралі, тобто область кругового дихроїзму є і областю селективного відбиття світла.

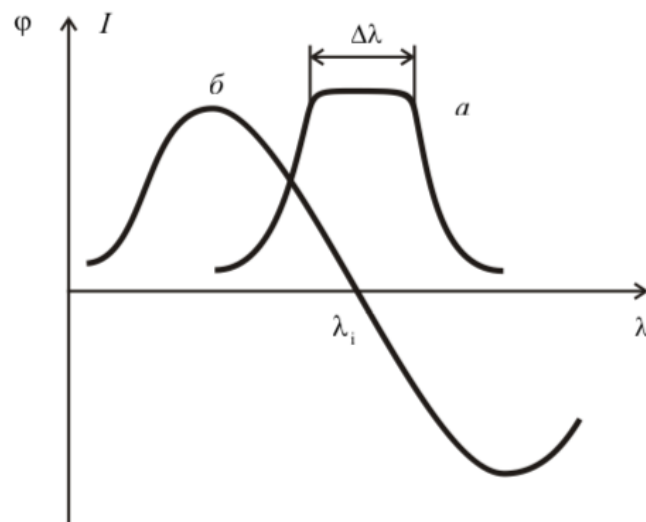


Рис. 3.3.2. Спектральна залежність селективного відбиття світла (а) і оптичної активності (б) для планарного шару холестерика.

В області селективного відбивання і кругового дихроїзму через холестерик практично без поглинання проходить світло з круговою поляризацією, яка протилежна за знаком холестеричної спіралі, але за межами цієї області світло, яке пройшло, має кругову поляризацію, що збігається зі знаком спіралі. По обидва боки від цієї області існують спектральні смуги гігантської оптичної активності [41].

Ці незвичайні оптичні явища в холестериках теоретично пояснюються на основі рішень рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами для середовища з анізотропними діелектричними властивостями, які періодично

змінюються за законами ідеальної спіралі, де нехтують ослабленням первинного пучка в зразку і враховують тільки одноразове розсіювання. Коротко кінематичне наближення стосовно ХРК викладено в [42].

Кількісний опис експерименту в рамках кінематичної теорії можливо тільки в ситуаціях, коли розміри (товщина) досконалих областей ХРК, що когерентно розсіюють світло, малі, так що можна знехтувати ослабленням світла за рахунок розсіювання в когерентно розсіяній області. Така ситуація реалізується або в тонких планарних зразках ( $d\delta/p \ll 1$ , де  $\delta$  - діелектрична анізотропія ХРК,  $d$  - товщина зразка), або в недосконалих (мозаїчних) зразках з малими розмірами окремих однорідних областей (доменів) [50]. При великій товщині кристалу, коли необхідно враховувати процеси багаторазового бреггівського розсіювання, кінематичне наближення не підходить для кількісного опису експерименту і навіть для пояснення ряду якісних ефектів (частотна залежність знака обертання площини поляризації, наявність дифракційного відбиття вищих порядків, частотні (або кутові) ширини областей селективного відбиття світла в ХРК, існування частотного (або кутового) інтервалу відбиття світла будь-якої поляризації при похилому падінні).

Таким чином, для ряду ефектів недостатнє врахування одноразового розсіювання, здійснюване кінематичним наближенням, і необхідний більш строгий розгляд взаємодії світла з ХРК. Це досягається шляхом знаходження для часткової ситуації точних рішень рівнянь Максвелла або їх чисельних рішень, а це вже виходить за рамки кінематичного наближення.

Розв'язання рівнянь Максвелла в ХРК в загальному випадку складні. Для випадку поширення світла уздовж оптичної осі ХРК (тобто для планарної текстури ХРК, - одного з найбільш частих випадків, який реалізується експериментально) відоме точне рішення [43].

У розв'язку рівнянь Максвелла використовується тензор діелектричної проникності  $\hat{\epsilon}$ , що має вигляд для досконалої холестеричної структури:

$$\hat{\varepsilon}(r) = \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}\delta \cos \tau z & \pm \bar{\varepsilon}\delta \sin \tau z & 0 \\ \pm \bar{\varepsilon}\delta \sin \tau z & \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}\delta \cos \tau z & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}, \quad (3.1.1)$$

У виразі 3.1.1 вісь  $z$  спрямована уздовж оптичної осі,  $\tau = \frac{4\pi}{P_0}$ ,  $P_0$  - крок холестеричної спіралі,  $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ ,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \varepsilon_3$  - головні значення тензора діелектричної проникності,  $\delta = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$  - параметр діелектричної анізотропії ХРК.

При освітленні холестерика білим світлом, колір дифракційно відбитого світла буде визначатися кроком холестеричної спіралі  $P_0$ , тому поверхня освітлена білим світлом холестерика має яскраво пофарбований вид. З підвищенням температури холестерична спіраль закручується, тобто крок спіралі зменшується (рис. 3.1.2). Зменшується при цьому і довжина хвилі дифракційно відбитого світла, що проявляється в зміні забарвлення холестерика зі зміною температури. Колір холестерика при нагріванні змінюється від червоного до фіолетового, проходячі всі кольори видимого діапазону.

Видиме забарвлення залежить також від кута до поверхні холестерика. Світло, відбите по нормалі до поверхні ( $\theta = \pi/2$ ), має максимальну довжину відбитої хвилі. При зменшенні кута  $\theta$  довжина хвилі відбитого світла зменшується. Тому якщо при спостереженні холестеричної плівки в перпендикулярному напрямку вона має, наприклад, червоний колір, то під гострим кутом вона може стати зеленою.

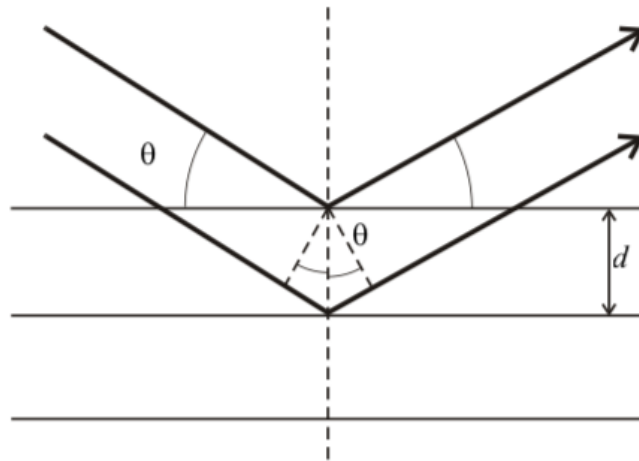


Рис. 3.3.2. Дифракція світла на холестеричній структурі.

Залежність тензора  $\hat{\epsilon}$  від координат полягає в зміні від точки до точки орієнтації головних осей тензора, локальний напрямок яких визначається орієнтацією молекул ХРК в даній точці. Як видно з формули 3.1.1, період зміни діелектричних властивостей ХРК дорівнює половині кроку. Два знака відповідають двом геометричним можливостям: плюс - правій, мінус - лівій холестеричній спіралі.

Відповідно до розв'язків рівнянь Максвелла для досконалої планарної текстури непоглинаючих ХРК для випадку поширення світла вздовж оптичної осі, коефіцієнт селективного відбиття світла з дифракційною поляризацією, який використовується далі для чисельних розрахунків, має вигляд:

$$R^+ = \frac{\delta^2 \sin^2 k^- d}{16(k^- \tilde{\lambda}^2 / \tau^2)^2 + \delta^2 \sin^2 k^- d}, \quad (3.1.2)$$

де  $k^- = \chi \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\lambda}^2 \pm \sqrt{4\tilde{\lambda}^2 + \delta^2}}}$ ,  $\chi = \omega \sqrt{\epsilon} / c$ ,  $c$  - швидкість світла,  $d$  - товщина шару

ХРК,  $\tilde{\lambda} = \tau / 2\chi$  відповідно,  $T^+ = 1 - R^+$ , де  $T^+$  - коефіцієнт пропускання хвилі з дифракційною поляризацією. В даному наближенні хвиля з



недифракційною поляризацією відбиття не зазнає, тобто  $R^- = 0$ ,  $T^- = 1$ , а  $T^+ \approx 0$ ,  $R^+ \approx 1$ . У випадку неполяризованого падаючого світла:

$$R = \frac{1}{2}(R^+ + R^-) \approx 0.5, \quad T = \frac{1}{2}(T^+ + T^-) \approx 0.5. \quad (3.1.3)$$

Дифракційна природа відбиття світла в ХРК проявляється тільки в інтервалі частот:  $\frac{\omega_B}{\sqrt{1+\delta}} < \omega < \frac{\omega_B}{\sqrt{1-\delta}}$ , де  $\omega_B = \frac{\tau c}{2\sqrt{\epsilon}}$  - Брегівська частота. Поза області селективного відбиття інтенсивність відбитого світла в міру віддалення частоти від області сильного відбиття, згідно формул 3.1.2 і 3.1.3 зменшується не плавно, а осцилює. Ці осциляції є наслідком дифракції світла в обмеженому об'ємі і не пов'язані з відбиттям від границь.

Формули 3.1.1 - 3.1.3 отримані при наступних припущеннях: одноразове розсіяння світла в шарі ХРК, відсутність відбиття світла на границях ХРК, мала величина параметра діелектричної анізотропії  $\delta$  ХРК.

Відзначимо, що селективно відбивається світло з круговою поляризацією, яка за знаком збігається зі знаком холестеричної спіралі. Світло з протилежною круговою поляризацією пропускається без зміни.

### 3.2 Термічне старіння холестеричних сумішей

Відомо, що при тривалому зберіганні і експлуатації холестеричні рідкі кристали і їх суміші піддаються старінню, наслідком якого є зміна їх фізичних і експлуатаційних параметрів. Наприклад, знижуються температури фазових переходів, звужується температурний інтервал рідкокристалічного стану, зменшується інтенсивність селективно відбитого світла і т.д. При певній мірі старіння система повністю втрачає рідкокристалічні властивості.

Старіння органічних речовин відбувається під впливом різних фізичних і хімічних впливів. У зв'язку з цим, розрізняють, наприклад, старіння під впливом температури (термічне старіння), світла (фотостаріння); різного роду радіації (радіаційне старіння), електричних полів - в результаті електричних розрядів або тривалого проходження струму (електричне старіння) і т.д. Обов'язковим наслідком цих видів старіння є утворення та накопичення в системі нових видів молекул, які призводять до зміни фізико-хімічних властивостей цих речовин [44].

Існує також структурне старіння, коли хімічна структура наявних в системі молекул і їх концентрація не змінюються в часі, проте змінюється надмолекулярна структура, ступінь кристалізації або інші структурні елементи речовини. Структурне старіння також призводить до зміни фізико-хімічних властивостей речовини [45].

Нами досліджувався вплив термічного старіння на фізичні властивості холестеричних рідких кристалів.

У чистих холестеричних рідких кристалах під впливом температури і навколишнього середовища можуть протікати в основному два процеси:

- а) окислення речовини атмосферним киснем,
- б) розкладання молекул речовини.

Максимальна температура, яка досягається в наших експериментах, не перевищувала 120 °С. Ця температура вище робочих температур членів

гомологічного ряду ефірів холестерину. Для перевірки факту розкладання молекул ефірів холестерину під дією температури, були проведені наступні досліди для всіх досліджених холестериків. Зразки при кімнатній температурі поміщалися в скляний реактор з платиновими електродами і обігріваним кожухом, в реакторі створювався вакуум приблизно  $10^{-3}$  мм рт.ст. і речовина нагрівалася до 110-120 °С за допомогою рідинного термостату. Після витримки в цих умовах близько години, для видалення газових бульбашок з об'єму речовини, реактор заповнювався сухим азотом до атмосферного тиску і посудина герметизувалася. Після цього, підтримуючи досягнуту температуру, з часом вимірювались електрофізичні параметри речовини мостом змінного струму. Результати вимірювань показали, що витримка зразків холестериків протягом 8-10 годин при 120 °С в вакуумі призводить до зміни їх електрофізичних параметрів. Цей факт свідчить про те, що молекули ефірів холестерину при зазначених вище умов не піддаються термічному розкладанню.

Отже, причиною термічного старіння холестеричних рідких кристалів є їх окислення атмосферним киснем.

Факт окислення холестеричних рідких кристалів визначався наявністю гідропероксиду відповідного ефіру після витримки зразків при певній температурі в атмосфері повітря (природне старіння) і чистого кисню (форсоване старіння). Кількість гідропероксиду визначалося методом іодометричного титрування. Досліди показали, що в результаті старіння в об'ємі зразків утворюється гідропероксид відповідного ефіру.

Таким чином, можна резюмувати, що при термічному старінні холестеричних рідких кристалів основним процесом є їх окислення атмосферним киснем.

### 3.3 Холестерична рідкокристалічна термографія

Термографія – це метод реєстрації видимого зображення власного інфрачервоного випромінювання поверхні досліджуємого об'єкту.

Медична термографія - метод обстеження пацієнтів за допомогою спеціального приладу - тепловізора (термографа), що дозволяє реєструвати інфрачервоне випромінювання і перетворювати його в термограму, яка показує розподіл тепла на поверхні тіла [46].

Випромінювані інфрачервоні хвилі містять інформацію про структури різної температури, що входять до складу тіла, і про їх розташування. Інфрачервоне випромінювання є низькоенергетичним і для ока людини невидиме, тому для його вивчення створені спеціальні прилади – тепловізори, що дозволяють реєструвати це випромінювання, вимірювати його і перетворювати на видиме для ока картину.

Визначення відмінності температури поверхні тіла при термографії здійснюється двома методами: в першому випадку використовуються рідкокристалічні індикатори, оптичні властивості яких дуже чутливі до невеликих змін температури (контактна рідкокристалічна термографія), другий метод — технічний і заснований на використанні тепловізорів (дистанційна термографія). Метод термографії об'єктивний, простий і абсолютно нешкідливий та не має протипоказань.

Дистанційна термографія. В основу роботи дистанційних термографів покладено принцип оптико-механічного сканування простору, коли потік інфрачервоного випромінювання об'єкту фокусується на чутливій матриці приймача, з наступним перетворенням його в електричний сигнал і відтворенням на екрані електронно-променевої трубки у вигляді термограми, з її фіксацією на електрохімічному папері чи фотоплівці. Подальше технічне удосконалення приладів дозволило отримувати кольорове зображення, будувати ізотерми, визначати температуру з точністю до 0,1 °С. Проте

недоліками перших поколінь приладів стали їх достатня громіздкість та складність фіксації результатів, що вело до труднощів аналізу отриманих даних.

Сучасні прилади дозволяють реєструвати інфрачервоне випромінювання з високою просторовою роздільною здатністю і температурною чутливістю до 0,02 °С на мінімальній площі виміру об'єкту (0,25 мм). Особливості конструкції камер дозволяють досягати високої повторюваності результатів виміру від кадру до кадру, досліджувати розвиток термоактивних процесів у часі. Комп'ютерні програми забезпечують в реальному часі якісну візуалізацію й кількісну обробку термограм, що забезпечує детальну оцінку патологічних процесів [47, 48].

Контактна термографія. Контактна холестерична рідкокристалічна термографія - термографічний метод реєстрації теплового випромінювання шкірних покривів людини і малих перепадів температури поверхні тіла за допомогою холестеричних рідких кристалів [49].

Для проведення КХРТ використовуються термоіндикаторні плівки на рідких кристалах, які представляють собою тонкий шар холестеричного рідкого кристалу між двома полімерними плівками. Для збереження оптичних властивостей поверх плівки наносять шар прозорого водостійкого лаку, що містить світлостабілізатори.

Холестерик – ідеальний кольоровий термоіндикатор, який при підвищенні або зниженні температури змінює свій колір від синьо-зеленого до жовтого та червоного . У більшості холестериків з ростом температури крок спіралі зменшується, а, отже, зменшується і довжина хвилі селективно відбитого світла  $\lambda_{max}$  (рис. 3.3.1). Іншими словами, кожній із зазначених на рис. 3.3.1 температур -  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  і  $T_3$  - відповідає свій колір.

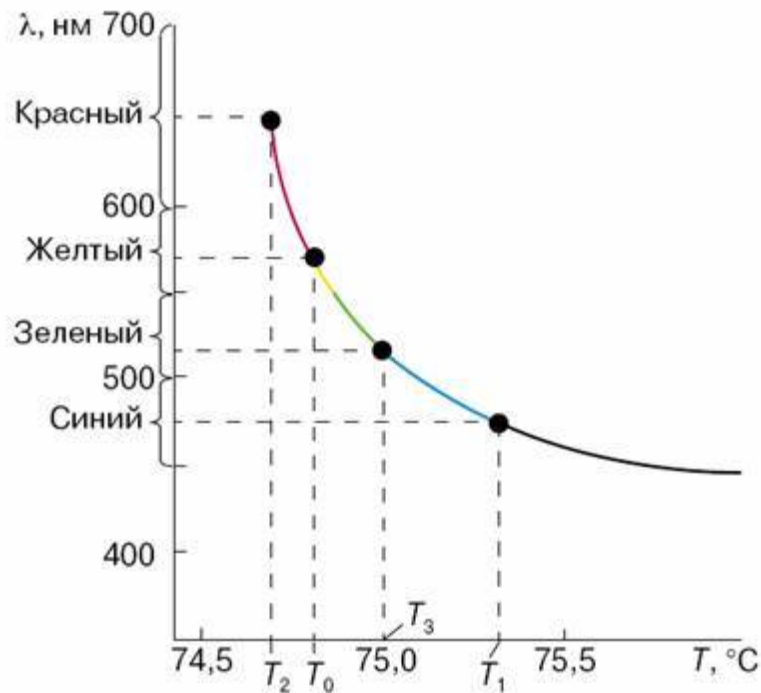


Рисунок 3.3.1. Температурна залежність довжини хвилі селективного відбивання  $\lambda_{max}$  шару холестеричного рідкого кристалу - холестерилпеларгонату

Термоіндикаторні плівки забезпечують чутливість до зміни температури, контрастність кольорів до та після зміни температури, стабільність до впливу зовнішніх факторів (за винятком температури).

Чутливість покриттів до температурних впливів залежить від їх теплопровідності і швидкості протікання хімічних або фізичних процесів у плівці. У зв'язку з цим термоіндикаторні покриття повинні мати високі коефіцієнти тепло - і температуропровідності. Для рідкокристалічних індикаторів похибка вимірювань температури коливається 0,1-0,5 %, в той час коли для термохімічних похибка складає аж 5-10 %.

Якщо тонку плівку холестерика помістити в теплове поле, яке не перегріває її в ізотропну фазу, то по-різному нагріті її ділянки матимуть різний колір, або, якщо висвітлювати її монохроматичним світлом, то - різну інтенсивність. Таким чином плівка холестерика працює як двовимірний неселективний тепловий приймач - візуалізатор. Фактично за допомогою

плівки холестерика ми фотографуємо теплове поле, перетворюючи теплове поле в видиме.

При контакті з шкірою холестеричні рідкі кристали розсіюють яскраві кольори. Зміна температури модифікує структуру кристалів, що відображається іншим кольором. Теплі місця об'єкту дослідження набувають фіолетового кольору, а холодні – червоного.

Переваги цього методу:

1. Абсолютна нешкідливість та безболісність. Так як метод заснований на реєстрації власних випромінювань об'єкта дослідження він є абсолютно нешкідливим для людини. Для проведення дослідження не потрібно вводити контрастні речовини або специфічно готуватися до обстеження, а отже така діагностика не має протипоказань і може призначатися людині будь-якого віку та з будь-якими алергічними реакціями, а також вагітним і годуючим жінкам.

2. Швидкість дослідження. Час, необхідний для встановлення результату – до 5 хв.

3. Недорога вартість рідкокристалічних плівок.

4. Можливість багаторазового застосування рідкокристалічних плівок (за умови дезинфекції спеціальними препаратами).

5. Дозволяє визначити різницю температур з точністю до  $0,07^{\circ}\text{C}$ , а тому вважається досить точним методом дослідження.

При такому способі вимірювання теплового поля плівка холестерика безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. Наносячи холестеричні рідкі кристали на різні поверхні, можна отримати топографію розподілу температури (рис. 3.3.2).

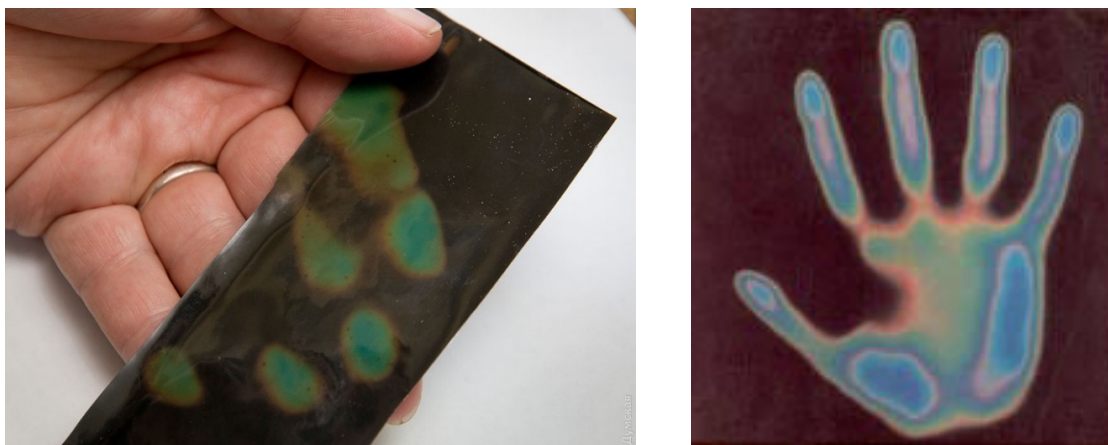


Рисунок 3.3.2. Топографія розподілу температури холестеричних рідких кристалів

Термоіндикаторні рідкокристалічні плівки можуть застосовуватися для неруйнівного теплового контролю в різних областях науки, техніки, медицини та ветеринарії. Вони можуть наклеюватися на об'єкт або формуватися безпосередньо на ньому. Зі зміною температури поверхні плівка змінює свій колір від червоного до синього і відтворює зображення теплового поля об'єкта [50 - 52].

Плівки можуть використовуватися для:

- отримання панорамної картини теплового поля на поверхні виробів різної конфігурації при дослідженні аеродинамічного нагріву та інших теплофізичних ефектів;
- визначення зон перегріву в радіо- і електрообладнанні;
- візуалізації невидимих ІЧ - випромінювань;
- виявлення зон витоку тепла;
- діагностиці запальних процесів в медицині і ветеринарії; - виготовлення медичних і побутових термометрів.

Та все ж, рідкокристалічна термографія має певні недоліки, що привело до її обмеження:

- необхідність попереднього нанесення на шкіру спеціальної фарби і трудність її видалення;
- малий термін придатності рідких кристалів;



- неможливість дослідження при порушенні цілісності шкірних покривів;
- складність інтерпретації та документування результатів.

Термографічне порівняльне дослідження. Нами були проведені дослідження на базі міжкафедральної навчально-наукової лабораторії неінвазивних методів досліджень біологічних об'єктів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

У дослідженнях використовувався термограф спільного виробництва Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Інституту монокристалів НАН України та Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» з охолоджуваною матрицею сенсорів на базі діодів Шотткі, який має температурну чутливість  $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.3.3) та термоіндикаторна рідкокристалічна плівка 2 типу, на основі суміші холестеричних рідких кристалів (рис. 3.3.4).

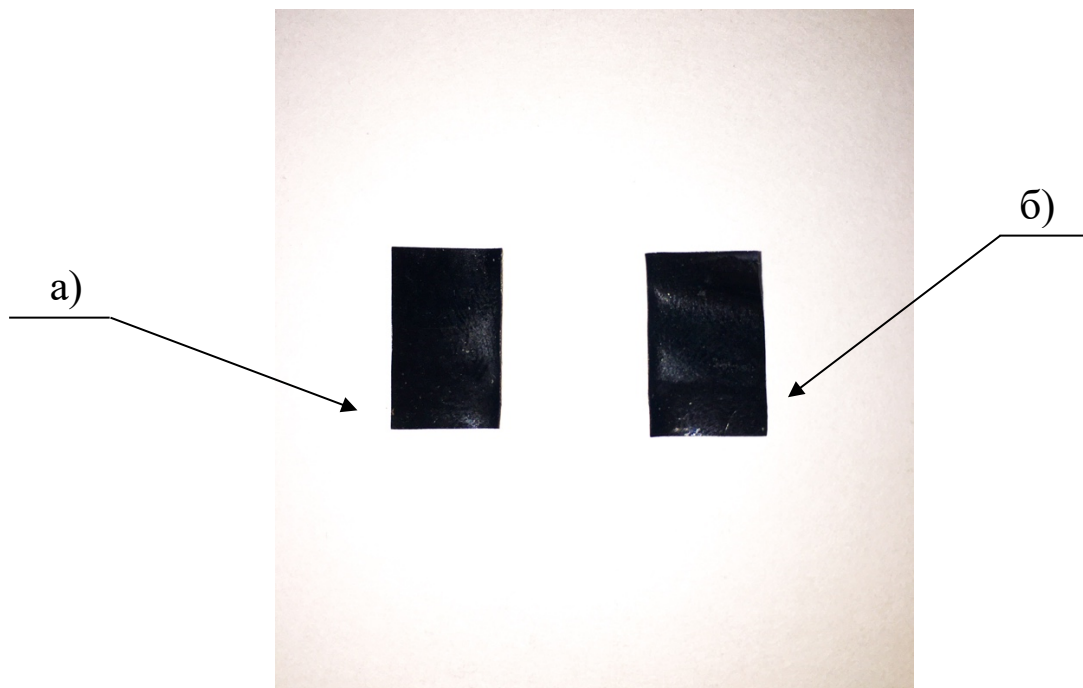


Рисунок 3.3.3. Рідкокристалічна термоіндикаторна плівка типу 1, яка розрахована на діапазон температур, що відповідають нормальній температурі людського тіла (а) та плівка типу 2, яка розрахована на діапазон температур, що відповідають підвищеній температурі людського тіла (б).



Рисунок 3.3.4. Термограф з охолоджуваною матрицею  
сенсорів на базі діодів Шотткі

Спостереження та контроль теплових полів за допомогою даного термографа виконувались в діапазоні 3–5 мкм. Основні характеристики термографа наведені у таблиці 3.3.1

Таблиця 3.3.1. Основні параметри ІЧ термографа з охолоджуваною матрицею елементів на базі діодів Шотткі.

Габарити, мм	287×192×130
Чутливість визначення температур, градуси Цельсію	0,1 (0,07)
Кут поля зору, град	40
Температура навколишнього середовища	Від +10°C до +30°C
Відносна вологість повітря	До 60% при +30°C
Число елементів матриці	256 (H) × 290 (V)
Розмір елемента	50 мкм (H) × 33 мкм (V)
Частота кадрів	25 Гц
Діапазон спектральної чутливості	2 ÷ 5,3 мкм
Вихідний сигнал камери	цифровий
Система охолодження	заливний азотний кріостат

Час безперервної роботи (без дозаправки) при температурі навколишнього середовища +18°C	не менше 6-ти годин
Напруга джерела живлення	220В±10% з частотою 50 Гц ± 1%

Важливими умовами коректного виконання дослідження є грамотна організація кабінету, а також підготовка до дослідження. Тому під час проведення експерименту у приміщеннях кабінету було вжито заходи для стабілізації впливу факторів зовнішнього середовища на термодіагностичну апаратуру та пацієнта. З цією метою на двері й вікна було навішано щільні світлозахисні штори. Можливі джерела інфрачервоного опромінення (батареї центрального опалення) були екрановані. В оглядовому приміщенні підтримувалась температура  $22 \pm 1$  °C, тому що при більш високій спостерігається зниження контрастності термограм, а при більш низькій — у досліджуваних біологічних об'єктів розвивається вазоконстрикція, що різко знижує інформативність методу. Відносна вологість повітря у приміщенні — 40–70 %, швидкість руху повітряних потоків не перевищувала 0,15–0,2 м/с.

Перед початком дослідження було записано поточну температуру досліджуваних об'єктів. Температура термоіндикаторної плівки становила 30,7 °C, температура верхньої кінцівки людини - 32 °C. На наступному етапі ми поклали плівку на поверхню верхньої кінцівки біологічного об'єкту. Через три хвилини, за допомогою термографа отримали термографічну картину, яка показує що температури досліджуваних об'єктів мають однакові значення, а саме 32,9 °C (рис. 3.3.5).

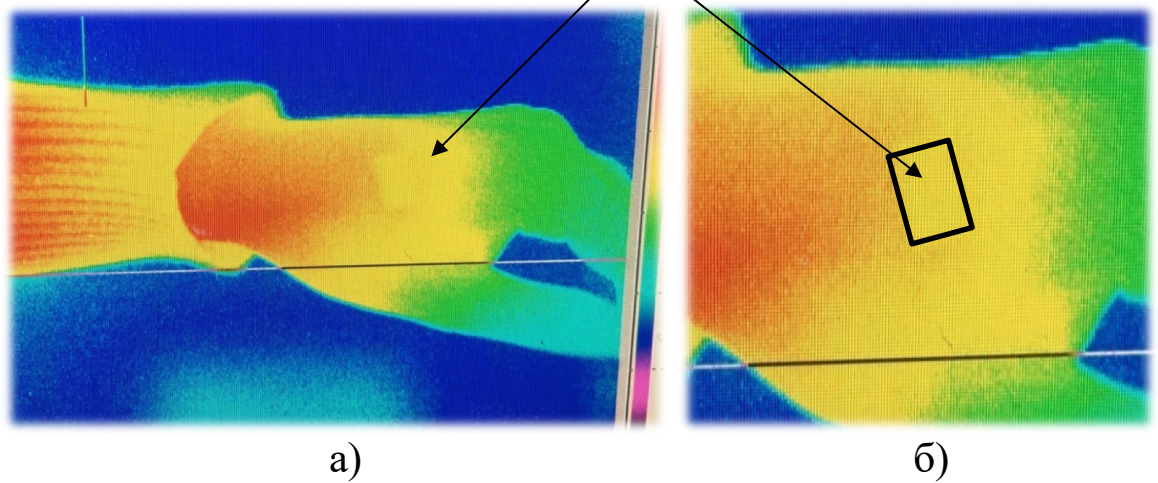


Рисунок 3.3.5. Розподіл температури на поверхні шкірного покриву верхньої кінцівки людини (а), збільшена термограма верхньої кінцівки людини з плівкою (б).

З цього випливає, що в місці де розміщена плівка, температура (колір) плівки такий самий як і температура поверхні верхньої кінцівки пацієнта, а отже між плівкою і рукою існує термодинамічна рівновага (тобто термоіндикаторна плівка правильно відображає поточну температуру руки).

## ВИСНОВКИ ДО III РОЗДІЛУ

1. Теоретично досліджено селективне пропускання світла недосконалою планарною текстурою ХРК в композиті, що містить об'ємну полімерну сітку.

2. На основі отриманих результатів зроблено висновок, що оптичні властивості розглянутих ХРК можуть бути описані в рамках існуючої теорії Бреґґівської дифракції світла на періодичній структурі ХРК.

3. Показано, що властивості рідких кристалів холестеричного типу - наслідок їх спіральної структури і того, що довжину кроку холестеричної спіралі можна порівняти з довжиною хвилі видимого світла.

4. Досліджено процес термічного старіння та його вплив на фізичні властивості холестеричних рідких кристалів. Показано що причиною термічного старіння холестериків є їх окислення атмосферним киснем.

5. Описано термографічні методи реєстрації теплового випромінювання - контактна та дистанційна термографія. Проведено аналіз переваг та недоліків використання термоіндикаторних плівок на рідких кристалах.

6. Проведено порівняльне дослідження за допомогою термографа з охолоджуваною матрицею елементів на базі діодів Шотткі та термоіндикаторної рідкокристалічної плівки, на основі суміші холестеричних рідких кристалів.

## ВИСНОВКИ

В даній роботі було поставлено за мету дослідити електрофізичні та термооптичні властивості, а також особливості будови холестеричних рідких кристалів та їх застосування.

Результати основних етапів дослідження:

1. На основі сумішей рідких кристалів, сажі та полімеру виготовлені два типи зразків.

2. Експериментально досліджено частотні залежності провідності (опору) та діелектричної проникності (ємності) зразків при різних температурах. Проведено аналіз отриманих експериментальних даних.

3. Проведено аналіз результатів, отриманих чисельними методами селективного розсіяння світла плівки з індукованої холестеричною спіраллю, який показав, що оптичні властивості розглянутих ХРК можуть бути описані в рамках існуючої теорії Бреггівської дифракції світла на періодичній структурі ХРК.

4. Проведено порівняльне дослідження за допомогою термографа з охолоджуваною матрицею елементів на базі діодів Шотткі та термоіндикаторної рідкокристалічної плівки, на основі суміші холестеричних рідких кристалів.

5. ХРК можна практично використовувати як: матеріали для запису інформації; регульовані електричним полем оптичні фільтри; прототипи систем нюху («електронного носа»); дзеркала з зміною довжини хвилі селективного відбивання світла під дією електричного поля, візуалізатори температурних полів, приймачі інфрачервоного і надвисокочастотного випромінювання [53].

Холестерики застосовують в голографії, в електрофотографії, для створення оптичних фільтрів і різних датчиків. Це ще не весь перелік можливих практичних застосувань таких матеріалів. Тому практичне

вивчення властивостей ХРК дасть можливість не тільки поліпшити характеристики вже запропонованих сфер використання таких матеріалів, а й відкрити нові можливості для впровадження наукових досягнень в практику, а також розширити їх межі використання. А реалізація таких можливостей буде важливою для потреб країни та загальнолюдської спільноти.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Володин А.Р. История открытия жидких кристаллов. Вестник Московского университета. Сер. 2 - Химия. 2003. Т. 43. № 2, 130-134 с.
2. Гриценко М.І. Фізика рідких кристалів / М. І. Гриценко. – К. : Академія, 2012. – 272 с.
3. Шибаев В.П. Необычные кристаллы или загадочные жидкости // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. N11. С.37-46.
4. Пикин С.А., Блинов Л.М. Жидкие кристаллы. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
5. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. 344.
6. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов – М.:Наука, 1982. -7 с.
7. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. – М.: Наука , 1978. -218 с.
8. Де Жен П. Физика жидких кристаллов: Пер.с англ./Под ред.А.С. Сони́на. - М.: Мир, 1977. -20 с.
9. Чистяков И.Г. Жидкие кристаллы. - М.: Наука, 1966. -14 с.
10. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1983. -320 с.
11. Pindak R.S., Huang CG. , Ho J.T. The intrinsic pitch of cholesteryl nonanoate // Solid state communications. 1974. Vol. 14. P. 821 - 825.
12. Лукьяченко Е.С., Козунов В.А., Григос В.И. Ориентация нематических жидких кристаллов // Успехи химии. 1985. Т.54. вып. 2. 214 - 238 с.
13. Пикин С. А. Стационарное течение нематической жидкости во внешнем электрическом поле – ЖЭТФ. 1971. Т. 60, № 3. С. 1185 – 1190.
14. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", – М. 1978. 384 с.



15. Elser W., Ennulat R.D. Selective reflection of cholesteric liquid crystals – *Advances in Liquid Crystals*. N.Y.: Acad. Press. 1976. V.2. P. 73 - 172.
16. L.A. Kutulya. Chiral organic compounds in the induced cholesteric mesophases – *Proceedings of SPIE*. 1988. V. 3488. P. 84 – 96.
17. Smits E., Engberts J.B.F.N., Kellogg R.M. cholesteric Carbohydrate Liquid Crystals Incorporating an Intact Glucopyranose Moiety – *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1997. Vol. 299. P. 427-432.
18. Браун Г. Жидкие кристаллы и биологические структуры / Г. Браун, Дж. Уолкен. – М. : Мир, 1982. – 198 с.
19. Готра З. Ю. Структура жидких кристаллов / З. Ю. Готра, М. В. Курик, З. М. Микитюк. – К. : Наукова думка, 1989. – 109 с.
20. Ruxer J.M., Solladie G., and Candau S. Helical twisting power of chiral substituted dibenzo /b,f/ 1,4 - diazocines in nematic liquid crystals – *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* Vol. 41. P. 109-114.
21. Kozawaguchii H. and Wada W. Helical twisting power in cholesteric liquid crystal mixtures // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1975. Vol. 14. N . 5. P.651 -660.
22. Bak: C.S., Labes M.M . Analysis of pitch-concentration dependences in some binary and ternary liquid crystal mixtures // *The Journal of Chemical physics*. V. 63. N . 2. P. 805 - 808.
23. Dixon G.D. and Scala L.C, Thermal Decomposition of Oholesteric Oleyl Carbonate. – *Mol, Cryst. and Liquid Cryst.*, 1970, v.10, p. 327-550.
24. Scala L.C, and Dixon G.D, Long Term Stability of Cholesteric Liquid Crystal Systems. – *Mol, Cryst, and Liquid Cryst.*,1970, v.10, p.411-425.
25. Америк Ю. Б., Кренцель Б. А., Химия жидких кристаллов и мезоморфных полимерных систем. – М., 2009, 12-33, 56-112 с.
26. Crawford G.P., Doane J.W., Zumer S. Captured orientational order in polymer network assemblies // *Liq.Cryst.* 1995. Vol.5. No. 1. P. 8-11.
27. Титов В.В., Севостьянов В.П., Кузьмин Н.Г., Семенов А.М. Жидкокристаллические дисплеи: строение, синтез, свойства жидких кристаллов. – Минск:Изд-во НПООО "Микровидеосистемы", 1998.

- 28.Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Статистическая физика макромолекул М. – СПб. : Политехника, 2001. – 258 с.
- 29.Чернов В.М. Исследование движений мицелл и образующих их молекул в лиотропных жидких кристаллах импульсным методом ЯМР. Жидкие кристаллы и их практическое использование, 2003, Вып.2, 27-36 с.
- 30.Гребёнкин М. Ф. Жидкокристаллические материалы / М. Ф. Гребенкин, А. В. Иващенко. – М. : Химия, 1989. – 288 с.
- 31.Аверьянов Е. М. Стерические эффекты заместителей и мезоморфизм / Е. М. Аверьянов. – Новосибирск : СО РАН, 2004. – 470 с.
- 32.Беляев В. В. Вязкость нематических жидких кристаллов / В. В. Беляев. – М. : Физматлит, 2002. – 222 с.
- 33.Томилин М. Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью / М. Г. Томилин. – СПб. : Политехника, 2001. – 325 с.
- 34.Цукрук В. В. Структура полимерных жидких кристаллов / В. В. Цукрук, В. В. Шилов. – К. : Наукова думка, 1990. – 253 с.
- 35.Каманина Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы нанoeлектроники. Свойства и области применения. Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2008 – 137с.
- 36.Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. –М.: Наука, 1978. 384 с
- 37.Адамчик А., Стругальский З. Жидкие кристаллы. – М.: Сов. радио, 1979. 160.
- 38.Капустин А.П. Экспериментальные исследования жидких кристаллов. Монография. Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", – М. 1978. 368 с.
- 39.Tsukamoto M. , Ontsuka T., Morimoto K., Murakami Y. Pitch and sense of helix in mixtures of optically active azo or azoxy compounds and nematic liquid crystal // Japanese Journal of Applied Physcs. 1975. Vol. 9. P. 1307 - 1312.
40. Чистяков И.Г., Горина И.И., Рубцова М.Ю. Оптические свойства многокомпонентных холестерических систем//Кристаллография. 1977. Т. 22. вып. 1. 149 - 154 с.

- 41.Беляков В.А., Осадчий С.М., Коротков В.А. Оптика несовершенных холестерических жидких кристаллов. Кристаллография. 1986. Т. 31, вып. 3. С. 522-527.
- 42.Беляков В.А., Дмитриенко В.Е., Орлов В.П.. Оптика холестерических жидких кристаллов. – М. : Наука, 1979, т.127, вып.2, с. 221-261.
- 43.Жаркова Г.М., Мамаев В.Н., Фокин Е.Н., Хачатурян В.М. Оптические свойства системы полимер - жидкие кристаллы - производные пиримидина // Изв. СО РАН СССР. Сер. тех. наук. 1984. вып. 3. 3-6 с.
- 44.Варданын Р.Л., Дингчян Г.Э., Ханукаев Б.Б., Варданын А.С. Механизм инициированного окисления сложных эфиров холестерина в растворе хлорбензола. - Кинетика и катализ, 1978, т. 19, 72-78 с.
- 45.Горина И.И., Чистяков И.Г. Текстуальные превращения не стабилизированных и стабилизированных смесей холестерических жидких кристаллов в процессе старения. - В кн.: Жидкие кристаллы. Ивановский Гос. Ун-т, Иваново, 1974, 80-106 с.
- 46.Маевский Е. И., Хижняк Л. Н., Смуров С. В., Хижняк Е. П. [и др.]. Настоящее и будущее инфракрасной термографии // Известия института инженерной физики. — 2015. — N 1. — С. 2–13.
47. Дехтярев Ю.П., Ничипорук В.И., Мироненко С.А. [и др.]. Место и роль дистанционной инфракрасной термографии среди современных диагностических методов // Электроника и нанотехнологии: материалы науч.-тех. конф. – Киев, 2010. – С. 192-195.
48. Розенфельд Л.Г., Самохин А.В., Венгер А.Ф. [и др.]. Дистанционная инфракрасная термография как современный неинвазивный метод диагностики заболеваний // Укр. мед. журн. – 2008. – Т. XI-XII, No 6 (68). – С. 92-97.
- 49.Свердлик А.Я. Метод тепловидения холестерическими жидкими кристаллами в офтальмологической практике: Автореф. дисс. канд. мед. наук / А.Я. Свердлик. – М., 1990. – 18 с.

50. Жаркова Г.М., Хачатурян В.М. Термографическое исследование бинарных систем некоторых жидких кристаллов // Изв. СО АН СССР. Сер. Техн. наук. 1976. Вып. 1, N 3. 102- 104 с.
51. Сухарьер А.С. Жидкокристаллические индикаторы. – М.: Радио и связь, 1991. 256 с.
52. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. – Новосибирск: Наука, 1994. - 216 с.
53. Каманина Н.В. Жидкие кристаллы - перспективные материалы оптоэлектроники. Свойства и области применения: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2004. 84 с.